

Министерство образования Российской Федерации
Российский государственный профессионально-педагогический
университет

Т.Г.Завражина

ДАТЧИКИ

Учебное пособие

Екатеринбург 2002

УДК 681.586 (075)

ББК 32.96-04

3 13

Завражина Т.Г. Датчики: Учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф. - пед. ун-та, 2002. – 87 с.

В учебном пособии приведены многочисленные примеры конструкций датчиков, а также схемных решений датчиков как основы автоматизации и компьютеризации различных процессов. Продемонстрированы возможности использования датчиков в промышленности и бытовой технике.

Предназначено для студентов специализаций 030503 – Электротехника, электрооборудование, электротехнологические установки (направление 540403) и 030532 – Организация производства – менеджмент в электротехнике и электротехнологии (направление 540432).

Рецензенты: доктор технических наук, профессор М.Б.Носырев (Уральская государственная горно-геологическая академия);
доцент, кандидат технических наук А.А.Карпов (Российский государственный профессионально-педагогический университет)

© Российский государственный
профессионально-педагогический
университет, 2002

© Завражина Т.Г., 2002

Оглавление

Введение.....	4
1. ОБЩИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.....	5
2. КОНТАКТНЫЕ ДАТЧИКИ ОСНОВНЫЕ ТИПЫ.....	7
3. УГОЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ.....	10
4. РЕЗИСТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ.....	14
4.1. Потенциометрические преобразователи.....	14
4.2. Тензометрические датчики.....	17
4.2.1. Проволочные тензодатчики.....	18
4.2.2. Фольговые тензодатчики.....	22
4.2.3. Полупроводниковые тензодатчики.....	24
4.3. Датчики температуры.....	25
4.3.1. Терморезисторы с отрицательным ТКС.....	27
4.3.2. Терморезисторы с положительным ТКС.....	32
4.3.3. Термопары.....	34
4.3.4. Температурный контроллер.....	38
5. ДАТЧИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ.....	42
5.1. Магниторезистивные датчики.....	43
5.2. Датчики Холла.....	44
5.3. Датчики Виганда.....	45
6. ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ.....	46
7. ЕМКОСТНЫЕ ДАТЧИКИ.....	50
7.1. Типы емкостных датчиков.....	52
7.2. Емкостные датчики влажности.....	56
8. ИНДУКТИВНЫЕ ДАТЧИКИ.....	58
8.1. Принцип действия индуктивного датчика. Основные соотношения.....	58
8.2. Реверсивные индуктивные датчики.....	60
9. ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ДАТЧИКИ.....	63
10. ИНДУКЦИОННЫЕ ДАТЧИКИ.....	70
11. ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ.....	73
12. ДАТЧИКИ РАСХОДА И СКОРОСТИ.....	77
13. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДАТЧИКОВ.....	79
Заключение.....	85
Литература.....	86

Введение

Стремительное развитие электроники и вычислительной техники оказалось предпосылкой для широкой автоматизации самых разнообразных процессов в промышленности, научных исследованиях, быту. Применение датчиков не ограничивается только автоматизированными системами, поскольку они могут выполнять также функции элементов измерительных систем для получения информации о регулируемом параметре или процессе. Научно-технический прогресс непосредственно связан с электровооруженностью производства, так как производительность труда пропорциональна его электровооруженности. Необходимо непрерывное совершенствование аппаратов на основе развития общей теории электроаппаратостроения, углубления представлений о физике явлений, протекающих в электрических аппаратах, и умения применять законы электротехники при их проектировании.

В русле общего направления технического прогресса существенные изменения претерпели и датчики. На смену электромеханическим и электровакуумным устройствам пришли твердотельные (полупроводниковые, сегнетоэлектрические и т.п.) элементы и приборы, которые затем все больше стали вытесняться интегральными схемами.

Совершенствование полупроводниковой технологии как в отечественной, так и в зарубежной практике позволило расширить сферы применения датчиков и повысить их точность, быстродействие, надежность, долговечность, удобство сопряжения с электронными измерительными схемами. Массовый характер производства датчиков способствует снижению их цены, что также является немаловажным фактором.

В пособии представлено многообразие датчиков: температуры, давления, усилия, индуктивные датчики перемещения, оптические датчики, их схемные решения как основы автоматизации и компьютеризации различных процессов. В доступной и наглядной форме изложены физические принципы и практические устройства широкого спектра датчиков различного назначения. Основное внимание при этом уделено их современным разновидностям на основе полупроводниковых материалов и приборов.

При описании некоторых датчиков (температуры, давления, оптических датчиков) на передний план выдвинуты некоторые специфические вопросы, связанные с новыми технологиями, кратко изложены общие принципы электрических чувствительных элементов.

Настоящее пособие разработано в соответствии с программой курса по электрическим аппаратам и может оказать существенную помощь в изучении дисциплины студентам электротехнических специальностей.

1. ОБЩИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Необходимость преобразования измеряемой неэлектрической величины в адекватный ей электрический сигнал послужила основанием для введения термина «измерительный преобразователь».

Датчик (измерительный элемент, электрический преобразователь, чувствительный элемент) – устройство, предназначенное для того, чтобы информацию, поступающую на его вход в виде некоторой физической величины, функционально преобразовать в другую физическую величину на выходе, более удобную для воздействия на последующие элементы (блоки). В большинстве случаев датчики преобразуют неэлектрическую величину в электрическую. Например, температура преобразуется с помощью термопары в ЭДС, механическое перемещение, связанное с изменением положения якоря электромагнита, изменяет индуктивность его обмотки. В некоторых случаях с помощью датчиков производится преобразование одних электрических величин в другие. В качестве таких датчиков могут служить усилитель, измерительный трансформатор или фазочувствительная схема.

По характеру электрических величин, получаемых на выходе, электрические датчики делятся на *параметрические*, или пассивные, и *генераторные*, или активные.

К *параметрическим датчикам* относятся такие элементы, у которых изменение контролируемой величины вызывает соответствующее изменение параметра электрической цепи (активного сопротивления, индуктивности или емкости).

К *генераторным датчикам* относятся такие датчики, которые сами являются источниками электрической энергии, причем возникающая на выходе энергия пропорциональна контролируемой величине.

К электрическим датчикам независимо от типа и устройства предъявляются следующие *основные требования*:

1. Надежность в работе.
2. Достаточная чувствительность, что позволяет существенно упростить схему системы, например автоматического контроля. В этом случае отпадает необходимость в усилении сигнала, точность системы повышается.
3. Осуществление необходимой непрерывной зависимости выходной величины y от входной x , т.е. $y = f(x)$, где x – контролируемая величина, а y – выходная величина, изменяющаяся под воздействием величины x .
4. Минимальные габариты и вес.
5. Необходимый диапазон изменения параметров.
6. Отсутствие обратного воздействия датчика на измеряемый процесс. Так, например, при изменении температуры контролируемой среды

из-за наличия в ней датчика может появиться значительная погрешность измерения.

7. Небольшая инерционность (интервал времени между изменением входной величины и соответствующим изменением выходной величины).

На работу датчиков оказывают влияние следующие факторы

1. Периодичность и максимальная частота процесса
2. Знакопеременность кривой изменения процесса и наличие в ней постоянной составляющей.
3. Температурные условия места измерения.
4. Атмосферные условия (влажность, температура воздуха и т.д.).
5. Наличие вибрации, ускорений или сотрясений в установке и др.

По структурному построению автоматизированные устройства напоминают такие биологические системы, как, например, человек. На рис. 1.1 проведена аналогия между человеком и автоматом по способам получения сигналов, их обработки и накопления, а также по преобразованию сигналов. Органам чувств человека соответствуют в автоматах датчики, а функ-



Рис. 1.1. Аналогия между процессами получения, обработки и преобразования сигналов в биологических (человек) и технических (автомат) системах

и активных органов выполняются исполнительными устройствами. Аналогом мозга как центрального устройства для обработки сигналов служит ЭВМ с ее системой памяти.

Сочетание датчик – ЭВМ – исполнительное устройство представляет собой информационную систему. Для упрощения сопряжения датчика с микро-ЭВМ была бы предпочтительна выдача датчиком цифровой информации. ЭВМ должны быть трансформированы в цифровые с помощью ЦП.

На рис. 1.2 показано прохождение сигнала от его возникновения в датчике с последующей обработкой в ЭВМ до выхода к исполнительным устройствам.



Рис. 1.2. Информационная система, включающая в себя датчик в качестве пассивного чувствительного элемента (получение сигнала) и исполнительные устройства в качестве активных преобразователей сигнала

2. КОНТАКТНЫЕ ДАТЧИКИ. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ

Контактные датчики – это датчики параметрического типа, у которых изменяется электрическое сопротивление при изменении той или иной механической величины. Они предназначены для преобразования механического перемещения в электрический сигнал. При достижении измеряемой величины определенного значения замыкаются или размыкаются электрические контакты, включенные в те или иные цепи, которые сигнализируют, что перемещение больше или меньше определенной величины.

Контактные датчики широко используются в системах автоматического контроля и сортировки размеров, а также в системах автоматической сигнализации различных автоматических величин. Статическая характеристика контактного датчика имеет релейный характер, так как его выходная величина – сопротивление электрической цепи – изменяется скачком.

На рис. 2.1, а изображен простейший контактный датчик с одной парой контактов — *однопредельный*. Замыкание контактов 1 и 2 происходит в результате изменения размера изделия I . Если размер изделия I увеличится, то измерительный шуп 3 переместится вверх, в результате чего контакты 1 и 2 придут в соприкосновение. При этом активное сопротивление между контактами 1 и 2 изменится от бесконечности до ничтожно малой величины, определяемой значением контактного сопротивления. Выводы a и b подключаются к сигнальному устройству. Пружина 4 соединяет измерительный шуп 3 с выводом b .

На рис. 2.1, б изображен *двухпредельный* контактный датчик с двумя парами контактов, способный реагировать на перемещение шупа в обе стороны от начального ("нулевого") положения. Подобные датчики широко используются для автоматического контроля размеров деталей и подсчета количества выпускаемой продукции.

Многопредельный контактный датчик с несколькими парами контактов показан на рис. 2.1, в. Контакты 1, 2', 3' замыкаются последовательно

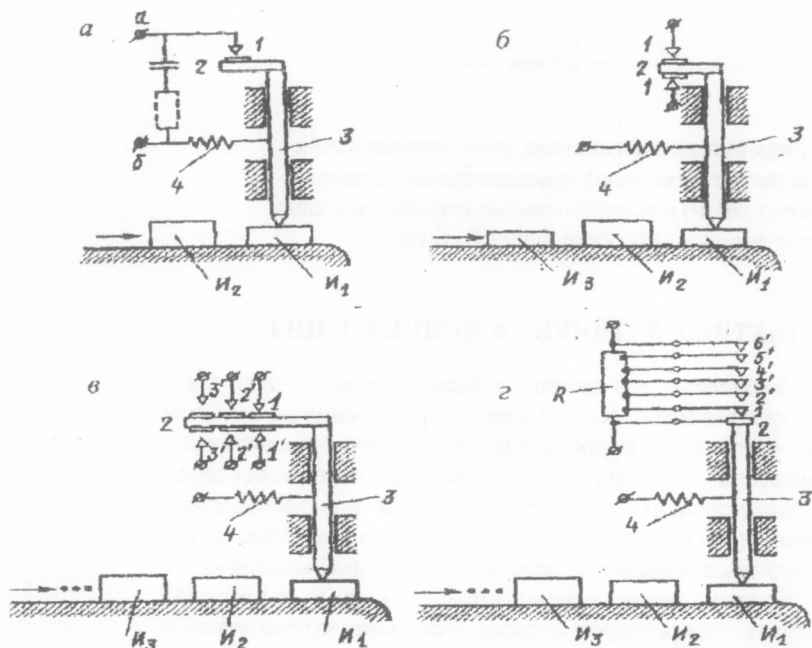


Рис. 2.1. Основные типы контактных датчиков:

a — однопредельный, $б$ — двухпредельный, $в$ — многопредельный, $г$ — замыкание части одного из сопротивлений резистора в целом

друг за другом в зависимости от размеров деталей. Стрелка измерительного прибора, включенного на выходе датчика, покажет три размера.

Иногда контактные датчики могут работать либо на замыкание (или на размыкание) всей цепи, либо на замыкание части одного из сопротивлений резистора R цепи (рис. 2.1, 2).

На рис. 2.2 показан двухпредельный контактный датчик, применяемый в сортировочных автоматах, который должен сигнализировать о поступлении деталей (размер детали l) с размерами, большими или меньшими допускаемых (Δl — допуск). Предположим, что поступает деталь меньше допускаемого размера, т.е. меньше $l - \Delta l$; в этом случае измерительный щуп 3 опустится и нижний неподвижный контакт 1' замкнется с подвижным контактом 2, в результате чего загорится неоновая лампочка М (меньше). Если же поступает деталь больше допускаемого размера, т.е. больше $l + \Delta l$, то она поднимает измерительный щуп 3 до такого положения, при котором верхний контакт 1 замкнется с подвижным контактом 2 и загорится неоновая лампочка Б (больше). При нормальных размерах деталей (в пределах допуска) контакты датчика останутся разомкнутыми, неоновые лампочки гореть не будут и автомат определит такую деталь как "годную".

Несмотря на простоту конструкции, такой датчик может контролировать размеры деталей с очень большой точностью — до 1 мкм. Чувствительность датчика будет зависеть только от величины зазора δ (см. рис. 2.2).

Надежность и точность контактных датчиков зависят от мощности, разрываемой контактами датчика, материала и качества изготовления контактов. Контроль изделия будет тем точнее, чем меньше обгорание контактов,

т.е. чем меньше мощность, разрываемая контактами датчиков.

Если контакты включены в цепь обычных ламп накаливания, то точность их работы значительно снижается и надежность ухудшается. Объясняется это тем, что электролампы накаливания потребляют значительный ток и в момент размыкания между контактами образуется искра (дуга), которая приводит к разрушению поверхностей контактов. Иногда для уменьшения мощности искры, или дуги, применяют искрогасительную цепочку, состоящую из последовательно соединенных конденсатора и активного раз-

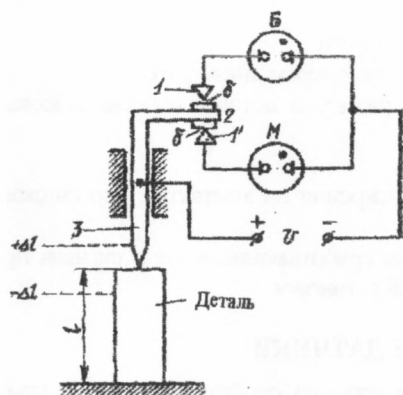


Рис. 2.2. Схема двухпредельного контактного датчика

рядного сопротивления, которая подключается параллельно контактам (штриховая линия на рис. 2.1, а).

Чаще всего для сигнализации вместо обычных ламп накаливания применяют неоновые лампочки (см. рис. 2.2), которые потребляют значительно меньшую мощность, порядка 80 – 150 мВт (1 – 1,5 мА при напряжении 80 – 100 В). В результате мощность, разрываемая контактами, будет менее значительной, обгорание контактов уменьшится и контроль изделия станет более точным. Однако более точные результаты измерения можно получить, если включить контактный датчик в сеточную цепь электронного усилителя. В этом случае подвижный контакт датчика подключается в сеточную цепь электронной лампы, которая потребляет весьма малый сеточный ток.

Выбор материала для контактов определяется исходя из контактного давления. Так, для высокочувствительных маломощных контактных датчиков давление на контактах изменяется в пределах от 0,001 до 0,02 Н. Для мощных контактных датчиков усилие колеблется в пределах от 0,5 до 1 Н. При значительных контактных давлениях (1 – 3,5 Н) контакты выполняются из вольфрама, молибдена или их сплавов, которые обладают большой твердостью и не подвергаются разрушению. При малых контактных давлениях (0,01 – 0,02 Н) контакты изготавливаются из платины и золота, которые почти не окисляются в нормальных атмосферных условиях. Однако их износостойкость и твердость невелики. При контактных давлениях в 0,5 – 1 Н применяют серебряные контакты. Высокой твердостью и устойчивостью против коррозии обладают контакты из родия.

Достоинства контактных датчиков:

- простота и дешевизна;
- простота регулировки чувствительности;
- возможность работы на постоянном и переменном токе;
- возможность контролирования размеров деталей с очень высокой точностью (менее 1 мкм).

Недостатки контактных датчиков:

- наличие электрической дуги и искрения на контактах, что снижает надежность их работы;
- возможность получения ложных срабатываний в цепи сигнала при наличии вибраций или резких сотрясений установок.

3. УГОЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ

Действие угольных датчиков основано на свойстве контактов изменять свое сопротивление в зависимости от усилия их сжатия. Воспринимающим элементом в нем является набор угольных шайб. Следует указать, что угольные микрофоны являются также датчиками контактного сопротивления, однако из-за невысокой стабильности их выходных характери-

стик такие датчики применяются исключительно для преобразования звуковых колебаний в электрические.

Угольные датчики применяются в основном для измерения больших усилий в шасси самолета при посадке, малых перемещений, момента, вибраций, ускорения, а также используются в качестве выходных органов в регуляторах напряжения.

Применяются два типа угольных датчиков: датчики в виде столбиков, собранных из угольных пайб или дисков, и датчики из тензолитов — так называемые тензометры. Рассмотрим некоторые из них.

Датчик в виде столбика из угольных пайб представлен на рис. 3.1, а. Столбик 1 высотой $h = 15 \div 20$ мм состоит из 10 — 15 угольных пайб, зажатых между двумя латунными стержнями 2 и 3. Пайбы изготовляются из электродных углей с удельным сопротивлением $30 - 100 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$, графита или керамики с графитовым заполнением, имеют диаметр $5 - 10$ мм и толщину $b = 0,5 \div 3,5$ мм.

Принцип действия датчика состоит в следующем. При сжатии столбика 1 усилием F контактное сопротивление между пайбами уменьшается, а при уменьшении приложенного усилия F сопротивление столбика увеличивается. Так, например, при повышении усилия до максимального рабочего значения $(50 - 60)10^5$ Па сопротивление столбика уменьшается на 20 — 30%. Таким образом, по измерению электрического сопротивления столбика можно определить измеряемую силу F , действующую на стержень 3.

Сопротивление угольного столбика датчика R_0 складывается из внутреннего сопротивления пайбы R_i и переходного контактного сопротивления между пайбами $R_{\text{пер}}$, т.е.

$$R_0 = R_i + R_{\text{пер}}. \quad (3.1)$$

Переходное сопротивление зависит от усилия F и определяется выражением

$$R_{\text{пер}} = 1 / (kF), \quad (3.2)$$

где k — постоянный коэффициент, зависящий от свойства угля, $\text{м}^2 / (\text{Н} \cdot \text{Ом})$.

Подставляя (3.2) в (3.1), получим

$$R_0 = R_i + 1 / (kF). \quad (3.3)$$

Зависимость сопротивления угольного столбика от усилия представлена на рис. 3.1, б. Как следует из рисунка, характеристика имеет нелинейный характер. Основанием для построения характеристики является формула (3.3). Наибольшую нелинейность характеристика имеет при очень малых усилиях (участок $0 - F_H$), следовательно, сопротивление угольного столбика на этом участке неустойчиво, нестабильно и может резко измениться от случайных сотрясений или ударов. Для того чтобы

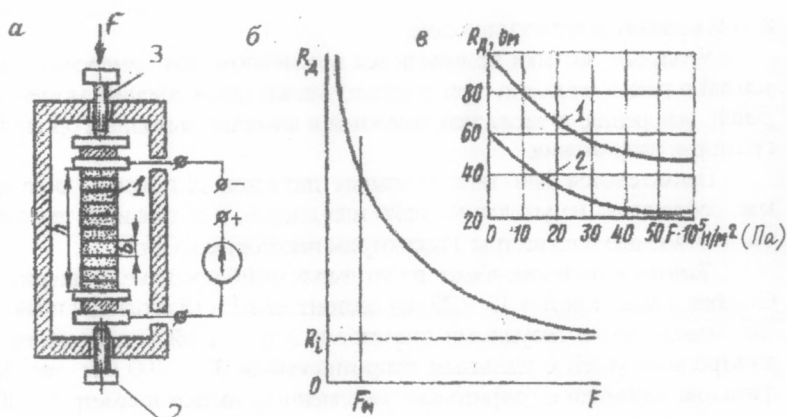


Рис.3.1. Угольный датчик (а) и его характеристики (б, в)

угольные столбики работали на более устойчивом участке характеристики, т.е. на участке, близком к прямой, их подвергают начальному сжатию с помощью стержня-винта 2 (см. рис. 3.1, а) усилием $F_H = (15 \div 20)10^5$ Па. Левый крутой и неустойчивый участок характеристики отсекается.

На рис. 3.1, в изображены две характеристики (1 и 2) угольных столбиков, набранных из различного количества дисков. Как видно, характеристика 2 – с меньшим количеством угольных дисков – имеет переходное сопротивление, примерно в 2,5 раза меньшее, чем характеристика 1 при одном и том же контактном давлении на столбик. Эти характеристики позволяют оценивать целесообразность применения данного угольного столбика для различных целей измерения.

Датчики из тензолитов (рис. 3.2) применяются для измерения упругих деформаций деталей машин и механизмов и поэтому получили название “тензометры”. Изготавливаются они из угольного порошка, графита или сажи, смешанной с изолирующим лаком, в качестве которого служат бакелитовый лак или шеллак (такая масса называется тензолитом).

Обычно величины деформаций малы и составляют несколько десятков микрон, поэтому тензометры должны иметь высокую чувствительность, малый вес и небольшие габариты. При установке тензометров на детали они, не оказывая влияния на величину деформаций, будут воспринимать быстропеременные (динамические) нагрузки.

Выполняются тензометры (см. рис.3.2) в виде нитей – стержней 1 диаметром около 1 мм с медными выводами (а и б). Способ применения тензометров следующий: на испытываемую или контролируемую деталь наклеивают полоску бумаги 2 длиной $l = 25$ мм, а на эту полоску приклеивают

тензолит 1. При деформации в деталях машин нить, воспринимая эту деформацию, растягивается или сжимается, происходит изменение плотности контакта между частицами угля в бакелитовом лаке, и, следовательно, сопротивление тензолита изменяется в ту или иную сторону в зависимости от того, будет ли стержень растягиваться или сжиматься.

Относительная чувствительность тензолитового датчика определяется выражением

$$\eta = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l},$$

где ΔR — изменение сопротивления датчика при изменении его длины Δl , $\Delta R / R$ — относительное изменение сопротивления; $\Delta l / l$ — относительная деформация нити (относительное изменение длины нити).

Тензолитовые датчики обладают высокой чувствительностью ($\eta = 20$ и более).

Достоинства угольных датчиков:

- простота конструкции;
- небольшие габариты, вес и стоимость;
- возможность работы на постоянном и на переменном токе.

Недостатки угольных датчиков:

- нелинейность характеристики;
- нестабильность сопротивления;
- влияние температуры на сопротивление столбика и его линейные размеры (поэтому для точных измерений применять их не следует);
- наличие некоторого гистерезиса.

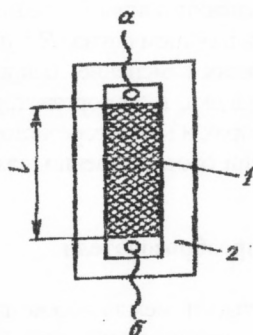


Рис.3.2. Тензолитовый датчик (угольный тензометр)

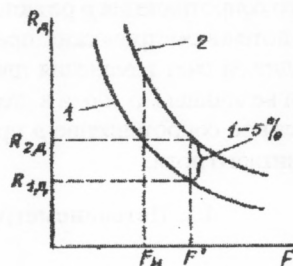


Рис.3.3. К определению погрешности угольного датчика

Дело в том, что из-за гистерезиса характеристика датчика, снятая при возрастании нагрузки, не совпадает с характеристикой, снятой при уменьшении нагрузки. Погрешность может составлять 1–5% (рис.3.3). На рисунке цифрой 1 обозначена характеристика датчика, снятая при возраста-

нии нагрузки, цифрой 2 – характеристика датчика, снятая при уменьшении нагрузки, R_{10} и R_{20} – соответствующие значения сопротивления датчика при одном и том же контаксном усилии F' . Возникновение механического гистерезиса объясняется тем, что при каждом сжатии угольного столбика имеющиеся неровности на поверхности шайб подвергаются разрушению и не возвращаются в первоначальное состояние после снятия усилия.

Указанные недостатки простейшего угольного датчика можно устранить, применяя угольный датчик дифференциального типа. Угольные столбики обычно включают в смежные плечи мостовой схемы. Следует отметить, что практически изготовить два одинаковых угольных столбика трудно, и, следовательно, при отсутствии воздействия усилия на датчик через прибор будет протекать небольшой ток (ток небаланса). Для уменьшения тока небаланса, т.е. для балансировки схемы, предусматривается регулируемый резистор (потенциометр).

4. РЕЗИСТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В зависимости от вида входной величины резисторные преобразователи делят на потенциометрические, тензорезисторы, терморезисторы и магниторезисторы.

Резисторные преобразователи предназначены для измерения перемещения и сил.

Принцип действия резисторных преобразователей основан на изменении электрического сопротивления при изменении длины l , сечения S , или удельного сопротивления ρ резистора, так как в общем случае $R = \rho l / S$.

В потенциометрических преобразователях изменение сопротивления происходит за счет изменения длины проводника, в тензорезисторах меняются три величины l , S и ρ , а в терморезисторах и магниторезисторах меняется удельное сопротивление ρ при изменении соответственно температуры или магнитного поля.

4.1. Потенциометрические преобразователи

Потенциометрические датчики преобразуют механические перемещения в изменение активного сопротивления электрической цепи. Потенциометрические датчики применяют в основном как датчики линейных и угловых перемещений.

В зависимости от закона изменения сопротивления различают линейные и функциональные потенциометры.

Потенциометрический датчик представляет собой резистор с переменным сопротивлением, который может быть включен по схеме реостата или по схеме потенциометра – делителя напряжения (рис. 4.1, а).

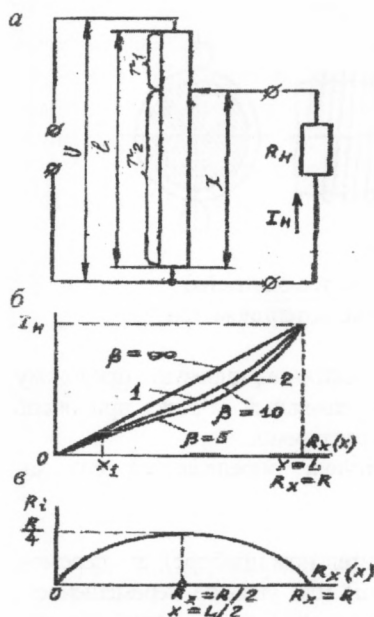


Рис. 4.1. Схема потенциометрического датчика (а) и его характеристики (б, в)

При перемещении подвижного контакта под воздействием контролируемой величины x происходит изменение сопротивления датчика. Следует отметить, что датчик в виде простого реостата почти не нашел применения вследствие значительной нелинейности его характеристики $I_H = f(x)$, где I_H — ток в нагрузке (см. рис. 4.1, а).

В конструктивном отношении потенциометрический датчик представляет собой устройство (рис. 4.2, а) из тонкого изолированного провода 2 с высоким удельным сопротивлением. По очищенной от изоляции 3 поверхности датчика скользит движок 1 (рис. 4.2, б). Изолированный провод наматывается в один ряд на плоский, цилиндрический или кольцевой каркас 4 из изолирующих диэлектрических материалов (гетинакс, текстолит, эбонит, электротехнический, пресспорошки). Каркасы повышенной точности изготовляют из металлов. Чаще всего применяют оксидированный алюминий марок АМГ, АД1, Д1 и др. Движок 1 представляет

собой металлическую проволоку, изогнутую на конце. Движок изготовляют из упругих материалов: палладий — иридий, палладий — серебро, палладий — серебро — кобальт и др. При перемещении движка по обмотке потенциометра его изогнутый конец, прежде чем сойти с предыдущего витка провода, касается следующего витка (см. рис. 4.2, а), вследствие чего в момент перехода с витка на виток контакт не нарушается.

Конструктивное выполнение потенциометрического датчика зависит от того, насколько большим может быть давление движка на обмотку. Если потенциометрический датчик используется для передачи показаний манометров, положения шасси самолета, измерения уровня жидкости или других приборов со значительным устанавливающим моментом, то обмотку датчика изготовляют из константановой или манганиновой проволоки диаметром 0,1 — 0,3 мм. В этом случае контактное давление движка на обмотку допускается в несколько граммов. Если потенциометрический датчик применяется для передачи показаний чувствительных приборов, например магнитного компаса, навигационных приборов, то величиной трения щетки об обмотку пренебрегать уже нельзя, необходимо, чтобы трение было незначи-

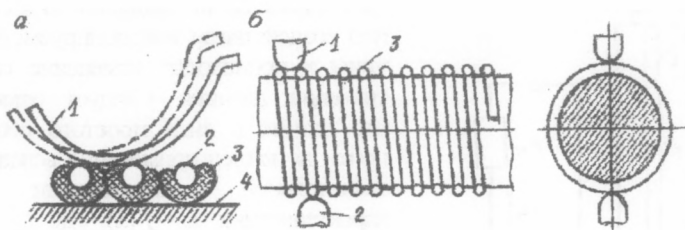


Рис. 4.2. Схема перемещения движка с одним (а) и двумя (б) контактами по обмотке потенциометра

тельным. В таких случаях применяют платиноиридиевую проволоку диаметром 0,03 мм, которая обеспечивает надежный контакт при очень малом контактном давлении – несколько миллиграммов.

Свойства потенциометрического датчика определяются его характеристикой

$$I_n = f(x),$$

где I_n – ток в нагрузке (например, в измерительном приборе); x – перемещение движка потенциометра (см. рис. 4.1, а) или угловое перемещение.

Рассмотрим основные соотношения и характеристику линейного потенциометрического датчика, у которого намотка проволоки на каркас равномерная и сечение проволоки по всей длине одинаковое. Величина тока в нагрузке I_n может быть найдена в соответствии с теоремой об эквивалентном генераторе, т. е.

$$I_n = U_{ab0} (R_k + R_n), \quad (4.1)$$

где U_{ab0} – напряжение на выходе потенциометрического датчика в режиме холостого хода (между точками а и б); R_k – внутреннее сопротивление датчика при заданном значении движка; R_n – сопротивление нагрузки.

Напряжение U_{ab0} определяется из выражения

$$U_{ab0} = U r_2 (r_1 + r_2), \quad (4.2)$$

где r_1, r_2 – сопротивления плеч датчика, т.е. $R = r_1 + r_2$.

Внутреннее сопротивление датчика можно определить из рис. 4.3 (пренебрегая малым внутренним сопротивлением источника тока):

$$R_k = r_1 r_2 / (r_1 + r_2). \quad (4.3)$$

Подставляя (4.2) и (4.3) в (4.1), получим значение тока в нагрузке

$$I_n = U r_2 / (r_1 + r_2) (R_k + R_n) = U k x / (r_1 + r_2) (R_k + R_n), \quad (4.4)$$

где k – коэффициент пропорциональности, определяющий величину сопротивления r_2 в зависимости от перемещения движка x , т.е. $r_2 = kx$.

Анализ (4.4) показывает, что если бы внутреннее сопротивление датчика R_k не зависело от перемещения движка x , то выходная харак-

теристика датчика $I_n = f(x)$ представляла бы собой прямую. Однако внутреннее сопротивление датчика зависит от перемещения x , т. е. $R_d = f(R_x)$ (см. рис. 4.1, в), и, следовательно, ток в нагрузке в общем случае (4.4) не будет пропорционален перемещению движка (наличие в знаменателе величины R_d показывает, что зависимость $I_n = f(x)$ — нелинейная).

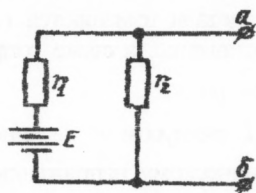


Рис. 4.3. Схема для определения внутреннего сопротивления потенциометра

Коэффициентом нагрузки называется отношение сопротивления нагрузки R_n к сопротивлению датчика R , т. е.

$$\beta = R_n / R. \quad (4.5)$$

Из формулы (4.5) следует, что если сопротивление нагрузки значительно больше сопротивления датчика, т. е. $R_n \gg R$, то коэффициент нагрузки стремится к бесконечности, т. е. $\beta = R_n / R \sim \infty$ (штриховая линия на рис. 4.1, б). Следовательно, током в нагрузке можно пренебречь и зависимость $I_n = f(x)$ будет также линейной. Уравнение (4.4) принимает вид

$$I_n = U k x / (R R_n). \quad (4.6)$$

Если же условие $R_n \gg R$ не соблюдается, то необходимо либо учитывать погрешность, вызванную нелинейностью характеристики, либо рабочий участок характеристики ограничить участком $0 - x_1$ с очень малой нелинейностью (см. рис. 4.1, б).

4.2. Тензометрические датчики

Тензодатчики, называемые также тензорезисторами, подобны тензолитовым датчикам и применяются для измерения упругих деформаций (напряжений), давлений, ускорений, малых перемещений, вибраций в различных частях механических конструкций. В основе работы тензодатчиков лежит явление тензоэффекта (тензорезистивный эффект), заключающееся в изменении активного сопротивления проводников при их механической деформации. В автоконтроле тензодатчики дают возможность определить как статические, так и динамические нагрузки.

На практике широко распространены проволоочные тензодатчики, а также фольговые, пленочные и полупроводниковые.

4.2.1. Проволоочные тензодатчики

Принцип работы проволоочного тензодатчика основан на изменении активного сопротивления проволоки под действием механических усилий. Под действием деформации детали изменяются геометрические размеры проволоки и удельное сопротивление, а также сопротивление проволоки

$$R = \rho l / S. \quad (4.7)$$

Пусть провод длиной l , радиусом r , сечением $S = \pi r^2$ и объемом $V = \pi r^2 l$ подвергается механическому напряжению усилием P (рис. 4.4); при этом проволока получает удлинение dl и уменьшение радиуса dr . Следовательно, новый объем проволоки $V_1 = \pi(r - dr)^2(l + dl)$. Пренебрегая бесконечно малыми высших порядков, получим

$$V_1 = \pi r^2 l + \pi r^2 dl - 2\pi r l dr = V + dV, \quad (4.8)$$

где dV — приращение объема.

$$\Delta V = S dl (1 - 2\mu), \quad (4.9)$$

где $\mu = \frac{dr/r}{dl/l}$ — коэффициент Пуассона для материала проволоки, характеризующий уменьшение поперечных размеров проволоки при растяжении.

Например, для идеальных материалов, не изменяющих при деформациях своего объема, $\Delta V = 0$ и $\mu = 0,5$. Металлическая проволока имеет $\mu = 0,24 \div 0,4$.

Для нахождения изменения сопротивления проволоки при растяжении необходимо:

1) продифференцировать равенство (4.1) — закон Ома:

$$dR = \frac{S d(\rho l) - \rho l dS}{S^2} = \frac{\rho \delta l}{S} + \frac{l d\rho}{S} - \frac{\rho dS}{S^2}; \quad (4.10)$$

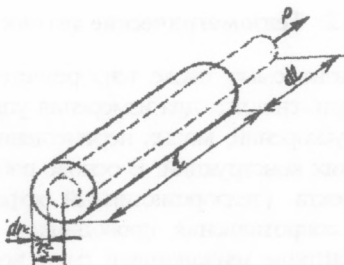


Рис. 4.4. К теории проволоочного тензодатчика

2) преобразовать выражение ldS , для чего продифференцировать объем проволоки $V = lS$, где $S = \pi r^2$:

$$dV = ldS + Sdl. \quad (4.11)$$

Сравнивая (4.11) и (4.9), получим

$$LdS = -Sdl2\mu. \quad (4.12)$$

Подставляя (4.12) в (4.10), найдем

$$dR = \frac{\rho dl}{S} + \frac{ld\rho}{S} + \frac{\rho 2\mu dl}{S}. \quad (4.13)$$

Разделив (4.13) на $R = \rho l / S$ получим выражение для относительного изменения сопротивления:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} + 2\mu \frac{dl}{l} = \frac{dl}{l}(1 + 2\mu) + \frac{d\rho}{\rho}. \quad (4.14)$$

Чувствительность (тензочувствительность) *проволочного датчика* — отношение величины относительного изменения его сопротивления к относительному изменению размера проволоки (относительная деформация). Следовательно, разделив (4.14) на dl/l , получим выражение для чувствительности датчика

$$S_d = \frac{dR/R}{dl/l} = 1 + 2\mu + \frac{l}{\rho} \frac{d\rho}{dl}. \quad (4.15)$$

Обозначив третий член уравнения (4.15) через коэффициент m , учитывающий изменение удельного сопротивления материала, связанное с изменением его геометрических размеров, получим $m = \frac{d\rho/\rho}{dl/l}$, тогда уравнение (4.15) примет вид

$$S_d = \frac{dR/R}{dl/l} = 1 + 2\mu + m. \quad (4.16)$$

Анализируя выражение (4.16), можно сказать, что слагаемое $1 + 2\mu$ характеризует изменение геометрических размеров и может иметь максимальную величину 1,8 (при $\mu = 0,4$). Однако значение тензочувствительности некоторых сплавов может превышать величину 2. Объясняется это тем, что при деформации проводника помимо его геометрических размеров изменяются и его свойства, в частности величина удельного сопротивления, учитываемая в (4.16) коэффициентом m .

Таким образом, в области упругих деформаций тензочувствительность зависит в основном от постоянной Пуассона и коэффициента m и является величиной постоянной, в пределах от 1 до 1,5 %.

Материал для изготовления тензодатчиков должен иметь большую чувствительность S_d . Объясняется это тем, что относительное изменение сопротивления $\Delta R/R$ у большинства материалов тензодатчиков очень мало и не превышает значения $(5 - 7)10^{-3}$. Следовательно, нагрев тензодатчика может вызвать изменение его сопротивления, соизмеримое с рабочим изменением. Поэтому для изготовления тензодатчиков рекомендуется применять сплавы, обладающие низким температурным коэффициентом сопротивления.

Устройство проволочного тензодатчика приведено на рис. 4.5. На полосу тонкой бумаги — подложки 3 или на лаковую пленку наклеивается с помощью специального клея 2 (бакелитовый клей или лак БФ-2) тонкая проволока 1, уложенная зигзагообразно в виде петель решетки диаметром 0,02 — 0,05 мм (рис. 4.5, а).

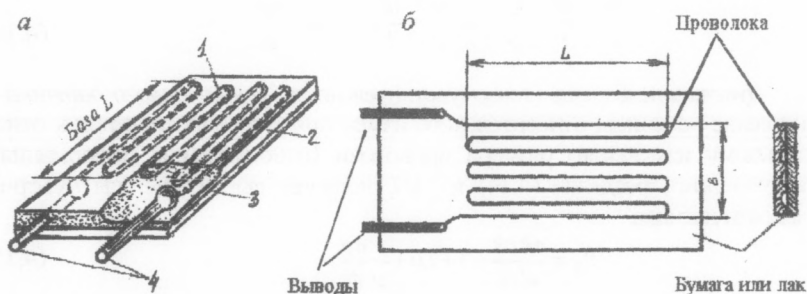


Рис. 4.5. Устройство наклеиваемого проволочного тензодатчика:
а — внешний вид, б — вид сверху

К концам решетки припаяны выводы 4. Сверху датчик покрывается слоем лака, а иногда заклеивается бумагой или фетром. Затем датчик приклеивается к испытуемой детали, благодаря чему деформация детали воспринимается проволочной решеткой, являющейся чувствительным элементом датчика. Выводы 4 подсоединяются к измерительной схеме. Следует отметить, что сопротивление датчика изменяется во много раз больше, если расположить его в направлении действия усилия (сжатие или растяжение), чем при расположении датчика в перпендикулярном направлении. Если расположить несколько датчиков под углом друг к другу, то можно выяснить не только величину деформации, но и направление действующих в детали усилий.

Достоинства проволочных датчиков:

- небольшие габариты, малый вес и дешевизна;
- безынерционность, что дает возможность измерять быстропеременные нагрузки;

- возможность размещения их в труднодоступных местах,
- простота в применении,
- достаточная стабильность,
- отсутствие гистерезиса (различие в сопротивлении для одних и тех же величин усилий при сжатии и последующем снятии сжимающего усилия).

Недостатки проволоочных датчиков:

- малая величина относительного изменения сопротивления, что вызывает необходимость иметь измерительные схемы высокой чувствительности;

- температурная погрешность. Дело в том, что при исследуемых в деталях деформациях сопротивление в тензодатчиках изменяется незначительно, поэтому температурные изменения сопротивления датчика могут внести погрешность даже в случае применения сплавов с низким температурным коэффициентом. Важно, чтобы сопротивление датчика не зависело от температуры.

Основные схемы расположения тензорезисторов для измерения деформаций (при нормальном нагружении) показаны на рис. 4.6, а – д.

Тензорезистор R_1 наклеивают на балку таким образом, чтобы его продольная ось совпадала с направлением деформации (рис. 4.6, а), где R_2 – компенсационный датчик.

При наличии четырех рабочих датчиков (полный мост) $\Delta U = 3,04$ мВ. При наличии двух рабочих тензорезисторов R_1 и R_4 , заключенных в смежные плечи мостовой схемы, т.е. когда тензорезисторы расположены симметрично на верхней и нижней сторонах балки (рис. 4.6, б), обеспечивается увеличение чувствительности в два раза, а также температурная компенсация.

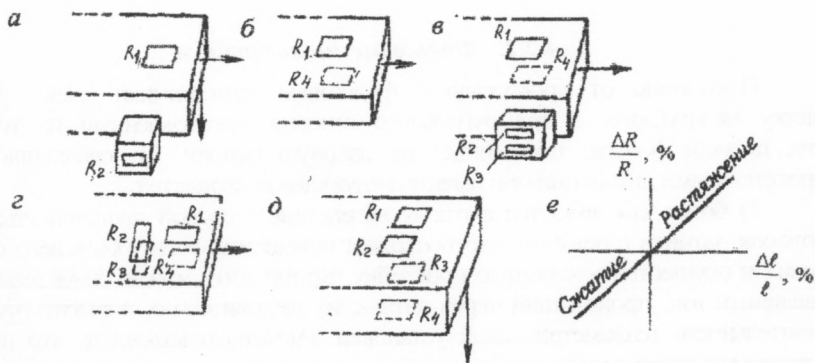


Рис. 4.6. Основные схемы расположения тензорезисторов (а, б, в, г, д) и характеристика проволоочного тензодатчика (е)

На рис. 4.6, в приведена схема полного моста, когда на исследуемую балку наклеены два рабочих тензорезистора R_1 и R_4 , а два других (компенсационных) тензорезистора R_2 и R_3 наклеены на вспомогательную деталь из того же материала и не подвержены деформации.

На рис. 4.6, г изображена схема для случая, когда компенсационные тензорезисторы наклеивают на ту же измеряемую балку, при этом их располагают перпендикулярно направлению действия силы. Тензорезисторы включены по схеме полного моста.

Иногда на балку наклеивают четыре тензорезистора (рис. 4.6, д). При этом на каждой стороне балки размещают по два рабочих тензорезистора, включенных в противоположные плечи моста. В этом случае сигнал на выходе моста увеличивается в четыре раза и, кроме того, обеспечивается температурная компенсация.

Для всех вышеперечисленных схем расположения тензорезисторов напряжение на выходе моста рассчитывается по определенным формулам.

Характеристика тензодатчика практически прямолинейна (рис. 4.6, е), т.е. чувствительность постоянна.

Основными характеристиками тензодатчиков наряду с величиной тензочувствительности S_d являются (см. рис. 4.6, а, б):

- база L — длина петль решетки;
- ширина решетки B ;
- длина выводов 4 ;
- активное сопротивление датчика;
- ползучесть — постепенное уменьшение воспринимаемой тензодатчиком деформации при постоянном значении деформации детали;
- сопротивление деформации;
- влагостойкость.

4.2.2. Фольговые тензодатчики

В отличие от проволоочных, фольговые тензодатчики имеют решетку не круглого, а прямоугольного сечения, изготовленную из тонких полосок фольги, нанесенных на лаковую основу. По сравнению с проволоочными датчиками они имеют следующие достоинства:

1) более высокую теплоотдачу вследствие большой площади стыка полосок датчика с деталью, что позволяет применить фольгу большего сечения и осуществить хорошую приклейку. Кроме того, можно значительно увеличить ток, проходящий через датчик, и, следовательно, повысить чувствительность тензометрической установки. Расчеты показывают, что при отношении ширины к толщине полоски, равном 10, допустимый ток у датчика из фольги в 1,4 раза больше, чем у датчика из проволоки того же сечения;

2) возможность увеличивать сечение концов датчика, что позволяет

осуществлять более надежное приваривание (или припайвание) выводов, чем у датчиков из проволоки;

3) значительно лучшую восприимчивость деформации из-за большего отношения периметра сечения плоской полосы к площади ее сечения, благодаря чему точность измерения деформации увеличивается.

Фольговые датчики изготавливаются из золотосеребряных сплавов, нержавеющей стали и других материалов. Лучшим материалом считается фольга из золотосеребряного сплава и медно-никелевая фольга.

В принципе фольговые датчики представляют собой весьма тонкую ленту из константановой фольги толщиной 4 – 12 мкм, на которой часть металла выбрана методом фототравления таким образом, что оставшаяся его часть образует решетку с выводами (рис. 4.7, а). Перед травлением фольгу покрывают светочувствительной эмульсией, на которую контактным способом наносят отпечаток решетки, проявляют и делают стойким к травильной кислоте. Обратную сторону покрывают слоем лака. После травления фольги получают решетку, которая прикрепляется к пленке из лака.

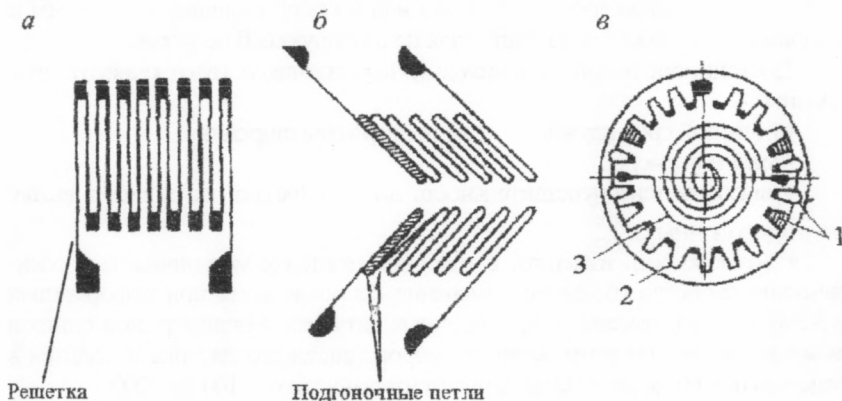


Рис. 4.7. Фольговые датчики.

а – для измерения фольговых деформаций; б – для измерения крутящих моментов; в – для измерения давления; 1 – подгоночные петли; 2 – витки, чувствительные к растягивающим мембрану усилиям; 3 – витки, чувствительные к сжимающим мембрану усилиям

Сопротивление фольговых датчиков лежит в пределах 30 – 250 Ом. Фотохимический способ позволяет создать любой рисунок решетки, что также является существенным достоинством фольговых датчиков.

4.2.3. Полупроводниковые тензодатчики

Полупроводниковые тензодатчики применяются в тех же случаях, что и обычные проволочные, т.е. для исследования деформаций и напряжений в деталях и узлах машин и конструкций. Внедрение полупроводниковых тензодатчиков в качестве чувствительного элемента преобразователей механических величин в электрический сигнал вместо обычно используемых в настоящее время проволочных тензодатчиков позволило значительно повысить чувствительность систем. Важнейшим достоинством преобразователей механических величин (силы, давления, перемещения, ускорения и др.) в электрические сигналы, построенных на основе полупроводниковых тензодатчиков, является большой выходной сигнал, благодаря чему оказалось возможным использование таких датчиков в устройствах измерения и контроля без вспомогательных усилителей. Эта особенность позволила уменьшить вес и размеры измерительной аппаратуры и повысить точность измерений.

Полупроводниковые тензодатчики выполняются в виде нитей длиной $l = 40 \div 60$ мм и диаметром $d = 1 \div 2$ мм или полюсок шириной $b = 4 \div 6$ мм и толщиной $\Delta = 1 \div 30$ мм, или в виде слоя на изолирующей подложке.

Достоинства полупроводниковых тензодатчиков (в отличие от проволочных):

- большой срок службы (не подвержены старению);
- малые размеры;
- высокая тензочувствительность до $S_d = 300$ (на два порядка выше, чем у проволочных);

• возможность изменять в широких пределах механические и электрические свойства (большое изменение сопротивления при деформациях до 50%), что невозможно в проволочных датчиках. Например, при одних и тех же размерах сопротивление полупроводникового датчика находится в пределах от 100 Ом до 50 кОм, а чувствительность от -100 до $+200$.

Недостатки полупроводниковых тензодатчиков:

- малая механическая прочность;
- неустойчивые характеристики;
- значительный гистерезис.

Полупроводниковые тензодатчики нашли применение при испытании на прочность элементов конструкции самолетов, измерении деформаций и напряжений, возникающих во вращающихся частях машин и механизмов, а также крутящего момента, передаваемого валами машин в статических и динамических режимах. Но из-за наличия указанных недостатков тензодатчики не получили широкого применения.

За последнее время стали использоваться кристаллические полупроводниковые материалы. Наибольшее практическое применение получили датчики, изготовленные из германия и кремния. Следует отметить, что

кремний обладает высокой чувствительностью, химически инертен, механически прочен и выдерживает нагрев до 540 °С. Кроме того, из кремния можно изготавливать и датчики различных форм.

В полупроводниковых тензодатчиках главную роль играет изменение удельного сопротивления, которое в основном зависит от коэффициента m . Для практических целей можно принять, что $S_d = m$. На чувствительность полупроводникового тензодатчика влияют ориентировка действия сил (кристаллографическое направление), количество примесей (удельное сопротивление), температура и деформация. Свойства полупроводниковых кристаллов можно изменять в очень широких пределах.

Подвод тока к полупроводниковым датчикам осуществляется через тонкие проводники диаметром 0,05 мм, выполненные из никеля, серебра или золота и вплавленные в концы пластины при температуре около 400° С.

Некоторые типы полупроводниковых тензодатчиков показаны на рис. 4.8.

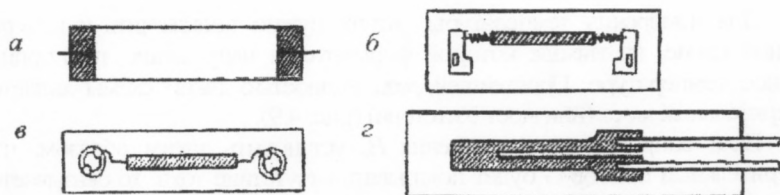


Рис. 4.8. Полупроводниковые тензодатчики:
а — без подложки, б, в — с массивными зажимами,
з — с U-образным тензочувствительным элементом

4.3. Датчики температуры

Важнейшей разновидностью датчиков являются датчики температуры, которые нашли широкое применение, в том числе и в повседневной жизни. Например, регулирование отопления на основании измерения температуры теплоносителя на входе и выходе, а также температуры в помещении и наружной температуры, температуры воды в стиральной машине, температуры электроулова, электроплитки, духовки и т.п.

Кроме того, путем измерения температуры можно косвенно определять и другие параметры, например, поток, уровень и т. п.

При использовании такого рода датчиков температура измеряется, как правило, на основании зависимости электрического сопротивления от температуры. В зависимости от того, возрастает или понижается электро-

сопротивление датчика при повышении температуры, различают полупроводниковые датчики соответственно с положительным или отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС).

Для точного измерения температуры в диапазоне от -200°C до $+850^{\circ}\text{C}$ чаще всего применяются датчики температуры из никеля или платины. Они всегда обладают положительным ТКС. Электрическое сопротивление металлических проводников изменяется согласно уравнению

$$R_t = R_0 [1 + \alpha(T_t - T_0)], \quad (4.17)$$

где R_0 – сопротивление при 0°C (т. е. при 273 K); R_t – сопротивление при температуре T_t ; α – температурный коэффициент, равный для платины $3,9 \cdot 10^{-3}\text{ K}^{-1}$ и для никеля $5,39 \cdot 10^{-3}\text{ K}^{-1}$.

Сопротивление при 0°C в большинстве случаев выбирается равным 100 Ом . Такие измерительные резисторы обозначают $Pt-100$ или $Ni-100$. Применяют также стандартно изготавливаемые сопротивления в 500 Ом и 1 кОм .

Для измерения температуры датчик нужно подключить к измерительной схеме, на выходе которой формируется напряжение, пропорциональное температуре. Простейшей разновидностью такой схемы является измерительный мост (или мост Уитстона) (рис. 4.9).

Если сопротивление сравнения R_v установить таким образом, что измерительный прибор G будет показывать отсутствие тока, то оказывается справедливым равенство $R_v = R_{Th}$, поскольку верхние параллельные соединения равны между собой. Преимущество такого способа измерения заключается в независимости результатов от напряжения питания. Для технических измерений, когда нужно иметь непосредственные показания температуры, сопротивление R_v можно принять постоянным, а показания измерительного прибора прокалибровать.

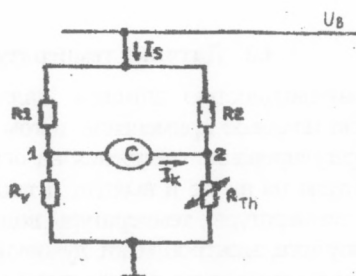


Рис. 4.9. Простая измерительная схема (мост Уитстона) для терморезисторов (например, $Pt-100$)

В случае измерения напряжения оно получается равным

$$U_M = U_b [R_t / (R_1 + R_2) - R_v / (R_v + R_{th})]. \quad (4.18)$$

При этом нужно использовать высокоомный вольтметр, так как между точками 1 и 2 не должен протекать ток.

Если же применяется низкоомный амперметр, то между точками 1 и 2 возникает ток короткого замыкания, определяемый выражением

$$I_k = I_S / [(R_1 R_{th}) / (R_1 + R_v) - (R_2 R_v) / (R_2 + R_{th})], \quad (4.19)$$

где I_S — ток питания.

Измерительный ток I_S должен быть очень мал, чтобы не вызывать нагревание резистора R_{th} , которое может привести к ошибкам измерения. Эта так называемая погрешность самонагрева зависит от подводимой электрической мощности ($P = I^2 R$).

4.3.1. Терморезисторы с отрицательным ТКС

Согласно стандарту Международной электротехнической комиссии (IEC Publ. 539), терморезисторами с отрицательным ТКС называются полупроводниковые резисторы, сопротивление которых падает при повышении температуры. У таких терморезисторов ТКС составляет около 3 – 6 % / К, что примерно в 10 раз больше, чем у платиновых или никелевых датчиков. Терморезисторы состоят из поликристаллической смеси различных спеченных оксидов, например, Fe_2O_3 (шпинель), $ZnTiO_4$, $MgCr_2O_4$, TiO_2 или NiO и CoO с Li_2O . Процесс спекания осуществляется при 1000 – 1400 °С. Затем изготавливают контакты путем вжигания серебряной пасты. Для обеспечения высокой стабильности сопротивления, прежде всего при длительных измерениях, терморезисторы после спекания подвергают еще искусственному старению. С помощью специальных режимов обработки достигается высокая стабильность сопротивления.

Температурная характеристика терморезистора описывается следующим уравнением:

$$R_T = R_N \exp [B (1/T) - (1/T_N)], \quad (4.20)$$

где R_T и R_N — соответственно сопротивления при температурах T и T_N (в градусах Кельвина); B — константа материала терморезистора, имеющая размерность К.

Тогда ТКС терморезистора оказывается равным

$$\alpha_R = -B / T^2. \quad (4.21)$$

Температурная характеристика терморезистора при различных значениях B показана на рис. 4.10.

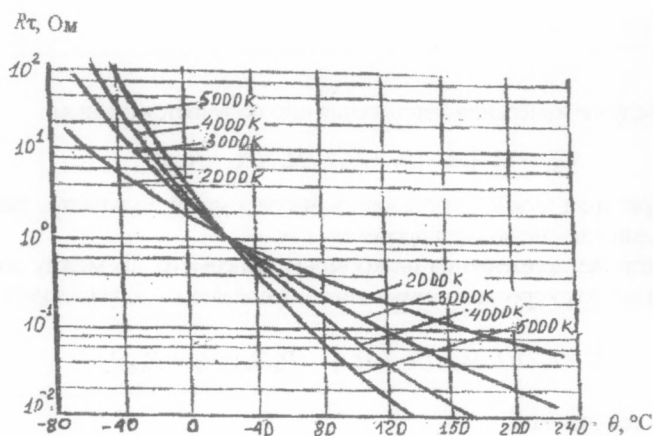


Рис. 4.10. Рабочие характеристики терморезисторов с отрицательным ТКС, отличающихся значением B

Существуют терморезисторы в различных конструктивных исполнениях, в том числе и миниатюрные для обеспечения быстрого реагирования на изменение температуры. На рис. 4.11 показаны наиболее распространенные конструкции терморезисторов: дискообразные, стержневидные и миниатюрные.

Для применения в автомобильной и бытовой электронике фирмой Siemens предлагается широкий набор специальных, не слишком дорогих терморезисторов.

Важным параметром терморезисторов является вольт-амперная характеристика (рис. 4.12). Она описывает связь между током, проходящим через датчик, и падением напряжения на нем. При токе около 1 мА вольт-амперная характеристика этих датчиков прямолинейна, так как еще не происходит изменения сопротивления из-за самонагрева. Если же ток через датчик увеличить, то его сопротивление изменится (станет меньше) и падение напряжения на нем уменьшится. В результате при определенном значении тока I характеристика имеет максимум, а при дальнейшем возрастании тока отклоняется вниз. Отмеченные на характеристике точки отражают изменение температуры датчика из-за самонагрева. Нагрев датчика, а вместе с тем и ход характеристики в значительной степени зависят от рабочей среды. На рис. 4.13 показана вольт-амперная характеристика типичного терморезистора в воздухе и на воде.

Поскольку в воде теплоотвод лучше, чем на воздухе, при размещении датчика в воде его характеристика проходит выше, чем на воздухе. Этот эффект можно использовать, например, для простого измерения уровня жидкости.

Если датчик работает на постоянном токе (около 10 мА), то падение напряжения на нем составляет около 6,8 В. Но в воде из-за более высокого

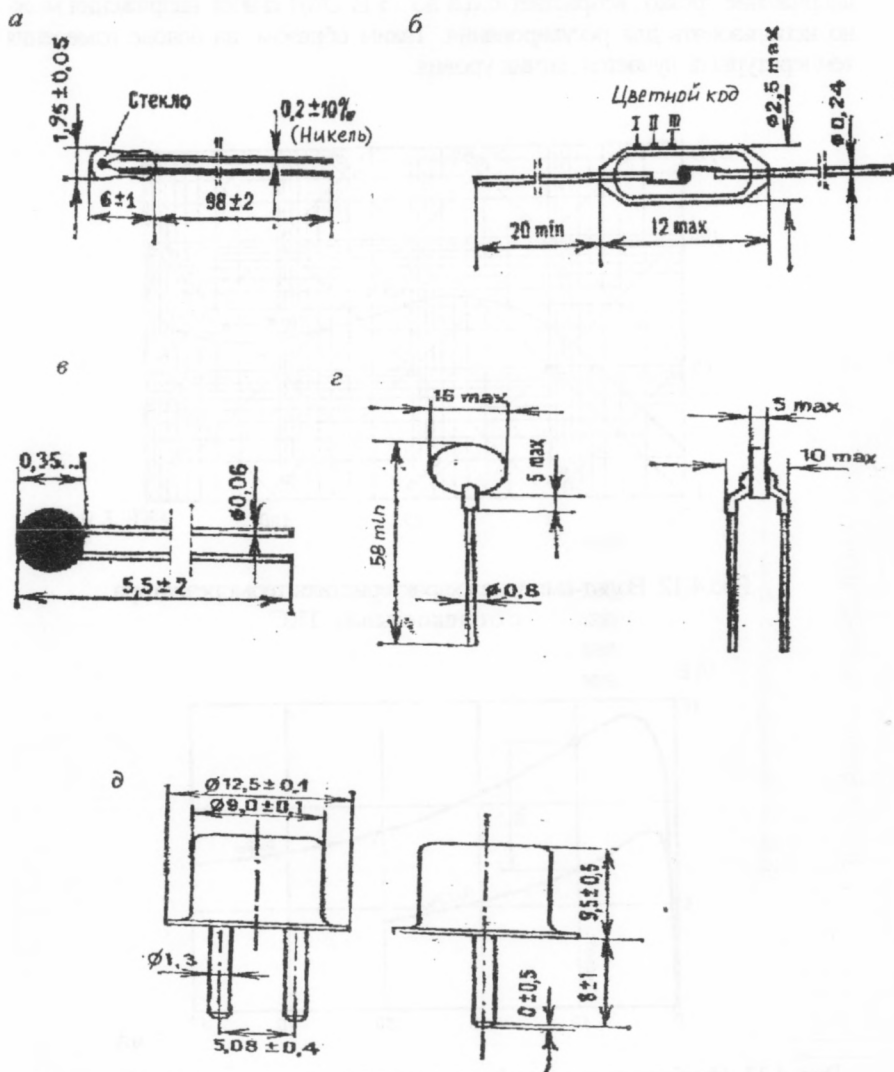


Рис. 4.11. Различные конструкции терморезисторов с отрицательным ТКС, используемых в качестве датчиков температуры
а, б — остеклянные; в — миниатюрные; г — дискообразные;
д — капсулированные

сопротивления оно уже оказывается равным примерно 13 В. Следовательно, как только датчик вступает в контакт с наполняющей средой (водой), напряжение резко возрастает с 6,8 до 13 В. Этот скачок напряжения можно использовать для регулирования. Таким образом, на основе измерения температуры получается датчик уровня.

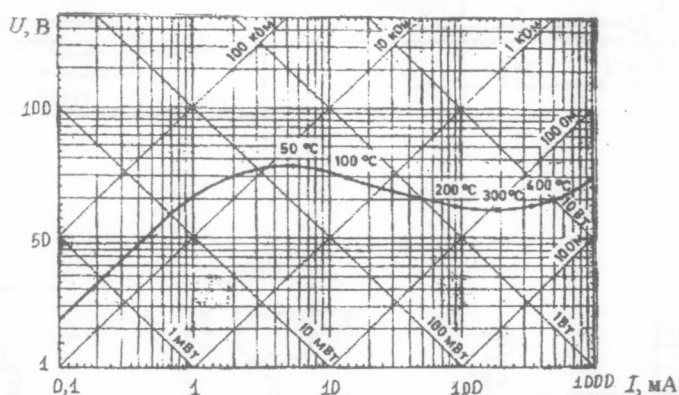


Рис. 4.12. Вольт-амперная характеристика терморезистора с отрицательным ТКС

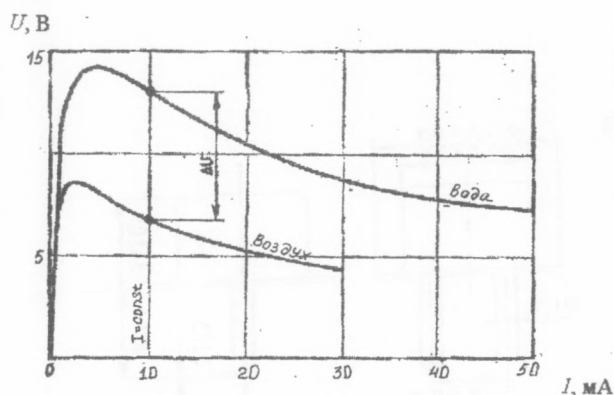


Рис. 4.13. Изображение в линейных координатах вольт-амперной характеристики датчика в различных средах

Если к терморезистору подключить еще резистор с не зависящим от температуры сопротивлением, то температурную характеристику терморезистора можно изменить. Путем подбора параллельного сопротивления

характеристику можно до определенной степени линеаризовать (рис. 4.14), так как S-образная характеристика имеет некоторую точку перегиба (T_W). Наилучшая линеаризация достигается, когда эта точка перегиба находится в середине требуемого диапазона измерения температур. Сопротивление R_p линеаризирующего резистора определяется по формуле

$$R_p = R_{TM} [(B - T_M)/(B + 2T_M)], \quad (4.22)$$

где R_{TM} — сопротивление терморезистора при температуре T_M ($T_M = T_W$); B — константа материала терморезистора.

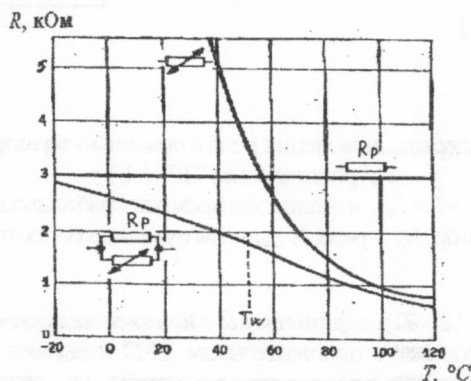


Рис. 4.14. Рабочие характеристики терморезистора с отрицательным ТКС и резистора с постоянным сопротивлением R_p , а также характеристика их параллельного соединения

Терморезисторы можно использовать также для задержки времени срабатывания реле (рис. 4.15). При подаче напряжения переключения U_B ток I протекает через реле и резистор R_T (рис. 4.15, а). Из-за высокого сопротивления терморезистора ток I меньше тока переключения I_S . В результате самонагрева терморезистора его сопротивление снижается, ток возрастает до величины тока переключения I_S и контакт S_2 замыкается (рис. 4.15, б). При этом время задержки τ (рис. 4.15, в) определяется по формуле

$$\tau \sim \frac{1}{U^n_B}, \quad (4.23)$$

где n принимает значения от 2 до 3.

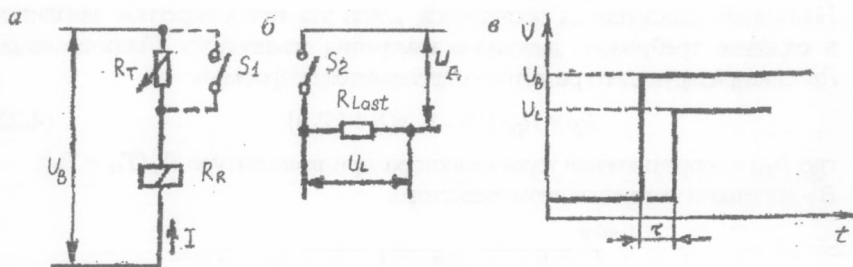


Рис. 4.15. Задержка выключения реле с помощью терморезистора с отрицательным ТКС (R_T):

$a-I < I_S$; $b-I > I_S$; c —задержка времени срабатывания реле τ ;
 R_T —резистор; R_R —реле; R_{Load} —нагрузочное сопротивление

4.3.2. Терморезисторы с положительным ТКС

Терморезисторами с положительным ТКС называют, согласно стандарту ФРГ, зависящие от температуры резисторы из легированной титановой керамики. Эти резисторы во вполне определенных областях температур имеют очень высокий положительный ТКС (α_R), обусловленный взаимодействием полупроводниковых и сегнетоэлектрических свойств

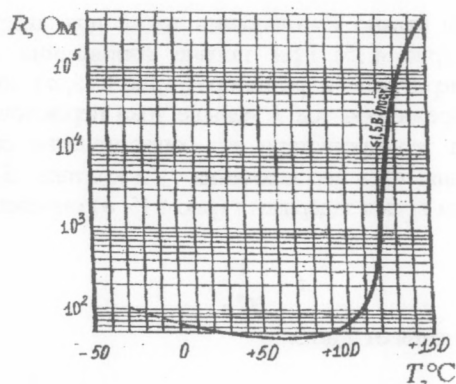


Рис. 4.16. Рабочая характеристика терморезистора с положительным ТКС

титанатной керамики. При изготовлении датчиков этого типа из смеси карбоната бария с оксидами стронция и титана путем прессования получают диски или стержни. Изменяя состав смеси, можно варьировать электрические свойства резистора. Материал спекают путем отжига заготовки при температурах в диапазоне 1000–1400 °С. Затем изготавливают контакты.

На характеристике сопротивление – температура (рис. 4.16) ясно видно резкое возрастание сопротивления при температурах выше 110 °С. При этом кривую можно разделить на отдельные участки в разных температурных диапазонах (рис. 4.17). Температура, при которой характеристика сопротивление – температура обладает явно выраженным положительным ТКС, называется температурой reagирования T_N . Обычно за T_N принимают температуру, при которой сопротивление терморезистора в два раза превышает минимальное значение R_{min} , т.е. $R_N = 2 R_{min}$. При некой температуре T_M температурный коэффициент такого терморезистора α_R описывается касательной к характеристике сопротивление – температура в точке, соответствующей этой температуре. При логарифмическом масштабе и $R_2 = 10 R_1$ получаем

$$\alpha_R = \frac{100}{0,4343} \cdot \frac{1}{T - T_1} \cdot \frac{\%}{K} \quad (4.24)$$

Максимальный ТКС, чаще всего приводимый в технических паспортах терморезисторов, соответствует наклону касательной в точку перегиба (см. рис. 4.17, в).

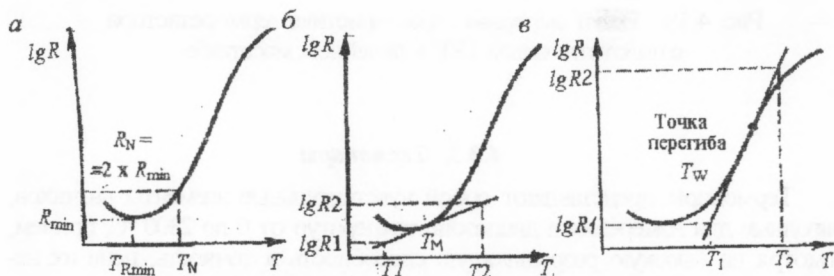


Рис. 4.17. Определение параметров датчика

а – температура reagирования T_N ; б – ТКС (α_R) при температуре T_M ,
в – касательная в точке перегиба T_W

Из статической вольт-амперной характеристики типичного терморезистора с положительным ТКС (рис. 4.18) отчетливо видно его ограничивающее ток действие. При малых напряжениях, согласно закону Ома, получается линейная зависимость между U и I . Однако, как только из-за большой потери мощности возникает самонагрев терморезистора, ток начинает быстро падать и в итоге стабилизируется. Этот процесс зави-

сит, естественно, от окружающей температуры и теплоотвода от терморезистора в рабочую среду.

Большой ТКС терморезистора в некотором узком температурном интервале и отличие теплоотвода на воздухе и в топливе дает возможность изготовить датчик уровня.

На рис. 4.19. показаны некоторые распространенные виды датчиков на основе терморезисторов с положительным ТКС, пригодные для различных применений.

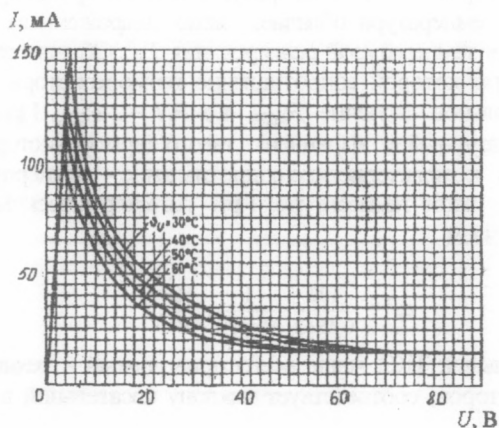


Рис. 4.18. Вольт-амперная характеристика терморезистора с положительным ТКС в линейном масштабе

4.3.3. Термопары

Термопары представляют собой чувствительные элементы датчиков, пригодные для измерения в диапазоне температур от 0 до 2300°C , причем, несмотря на высокую разрешающую способность и точность, цена их невысока. Термопары изготавливают путем соединения двух разнородных металлических проводов, например, меди и медно-никелевого сплава, железа и медно-никелевого сплава или платины и платинородиевого состава (рис. 4.20). Две такие термопары образуют полный датчик. Если один спай погрузить, например, в тающий лед (0°C), а второй ввести в контакт с объектом измерения, то между спаями возникает термо-ЭДС, составляющая в зависимости от вида термопары 7–75 мкВ/ $^\circ\text{C}$ (рис. 4.21).

В случае термопары из меди и медно-никелевого сплава термо-ЭДС в диапазоне температур 0– 100°C составляет примерно 40 мкВ/ $^\circ\text{C}$. При разности температуры спаев в 100°C получается примерно 4,3 мВ. Для дос-

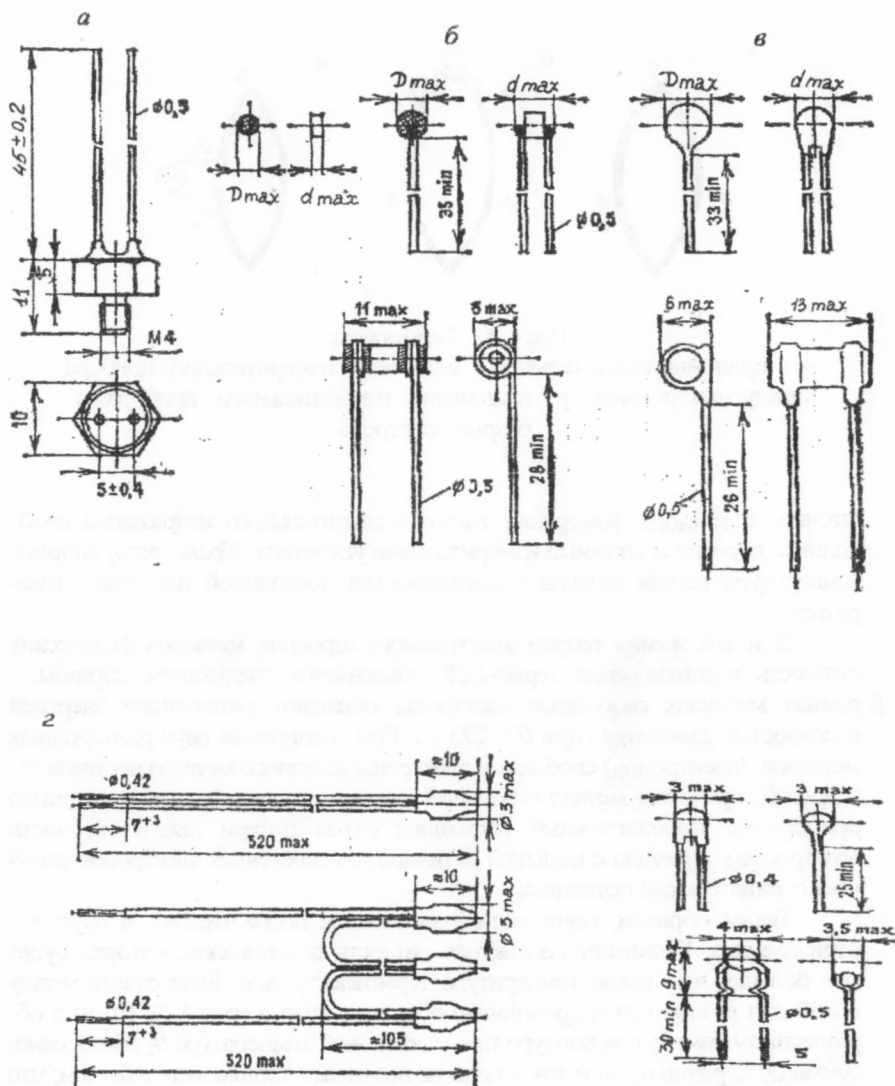


Рис. 4.19. Различные конструктивные формы датчиков температуры на основе терморезисторов с положительным ТКС (фирмы Siemens AG):
 а – датчик в корпусе с резьбой, б – металлизированный (для пайки);
 в – с оболочкой, г – без оболочки

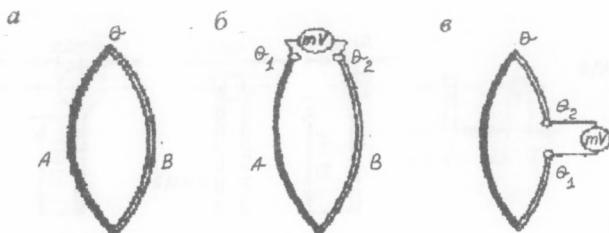


Рис.4.20. Термопары

а – принципиальная схема; б – включение измерительного прибора между электродами; в – включение измерительного прибора в разрыв электрода

таточно ! точного измерения такого незначительного напряжения необходимы дорогие и сложные измерительные усилители. Кроме того, опорная температура всегда должна поддерживаться постоянной или тоже изменяться.

С точки зрения теории электронного строения металлов физическая сущность возникновения термо-ЭДС объясняется следующим образом. В разных металлах свободные электроны обладают различными энергиями и скоростью движения (при $\theta = 273 \text{ К}$). При соединении двух разнородных металлов (электродов) свободные электроны из одного металла проникают в другой, при этом металл с большей активностью свободных электронов приобретает положительный потенциал (из-за потери некоторой части электронов), а металл с меньшей активностью свободных электронов получает отрицательный потенциал.

Таким образом, один металл заряжается положительно, а другой – отрицательно. Возникает контактная разность потенциалов, которая будет тем больше, чем выше температура термоэлектродов. Если спаять между собой два разнородных проводника обоими концами (рис.4.20, б), то в образованном замкнутом контуре при одинаковой температуре θ_2 обоих спаев сумма ЭДС равна нулю и ток в цепи не возникает. Объясняется это тем, что в обоих спаях возникает одинаковая по величине, но обратная по знаку контактная разность потенциалов.

Если нагреть один из спаев (рабочий) до температуры θ_1 , то контактная разность потенциалов в нагретом спае увеличится, а в ненагретом (холодном) спае температура θ_2 останется без изменений. В результате в контуре возникнет термо-ЭДС, величина которой зависит от разности температур нагрева спаев.

Термопары являются датчиками генераторного типа (преобразующими тепловую энергию в ЭДС). Они используются в теплотехнике и

металлургии для измерения температуры выходящих газов, для контроля режима работы реактивных двигателей.

Для измерения термо-ЭДС, развиваемой термопарой, в цепь термопары включают измерительный прибор либо свободными концами, либо в разрыв термопары (см. рис. 4.20, б, в). Несмотря на внешнее отличие схем б и в от схемы а, термо-ЭДС, развиваемая термопарами, в обоих случаях будет одинаковой, если одинаковыми будут температуры горячих и холодных спаев.

При последовательном соединении нескольких термопар их термо-ЭДС суммируются.

Кроме промышленного измерения температур, специальные термопары используются при измерениях тепловой радиации, для измерения температуры нагревателей в термоанемометрах и вакуумметрах. Термопары этого типа работают при сравнительно небольших температурах, но для повышения точности измерения они должны поглощать минимальное количество теплоты, поэтому такие термопары изготавливаются из тонкой проволоки диаметром $d \approx 5 \div 10$ мкм. Для повышения выходной ЭДС используется несколько термопар, образующих термобатарею.



Рис. 4.21. Измерение температуры термопарой с использованием в качестве опорной точки температуры таяния льда (0°C)

В последнее время получили распространение интегральные схемы для измерения с помощью термопар без опорной точки при 0°C . Они содержат внутренний компенсатор точки таяния льда, поэтому достаточно одной термопары. Имеется типовый блок (фирма Analog Devices) для термопары константан — железо. Преобразователь сигнала термопары AD594 линейризует термо-ЭДС датчика с коэффициентом $10\text{ мВ}/^\circ\text{C}$ в интервале измерений $0 - 300^\circ\text{C}$. Если собственная температура блока изменится, то влияние этого изменения можно компенсировать только с помощью соответствующего поправочного коэффициента.

Принципиальная схема устройства, предназначенного для измерения температуры вращающихся деталей (рис. 4.22), состоит из двух П-образных магнитопроводов 1, обмоток возбуждения 2 и 2' и сигнальных обмоток 4 и 4'. Обмотки возбуждения располагаются на двух стержнях подвижного магнитопровода, а сигнальные обмотки — на двух стержнях неподвижного магнитопровода. Подвижный магнитопровод закреплен на вращающемся валу 3. Катушки возбуждения и сигнальные катушки включены последовательно и согласно по отношению к рабочему потоку. Однако по отноше-

Типичные параметры датчика LM 3911

Параметр	Значение
Ток питания (максимальный), мА	10
Напряжение обратной связи на входе, В	0...7
Напряжение на выводе коллектора (максимальное), В	36
Рабочая температура, °C	-25...+85
Максимальная внешняя температура (про действию в течении 10 с), °C	300
Выходное напряжение при -25 °C, В	2,36...2,6
Выходное напряжение при +25 °C, В	2,88...3,08
Выходное напряжение при +85 °C, В	3,46...3,7
Линейность (T = 100 °C), %	1
Длительная стабильность, %	0,3
Воспроизводимость, %	0,3

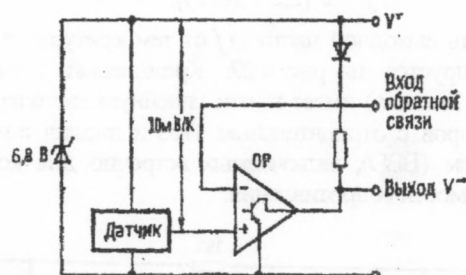


Рис. 4.23. Структурная схема температурного контроллера на основе интегральной схемы LM 3911 фирмы National Semiconductor

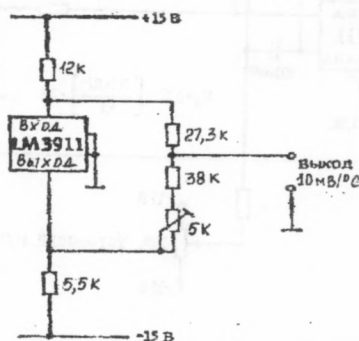


Рис. 4.24. Схема включения температурного контроллера LM 3911 с градуированным выходом 10 мВ/°C

стве температур, т.е. при $T_1 = T_2$ настроенным потенциометром (100 кОм) выходное напряжение U_A устанавливается равным нулю. Калибровка чувствительности осуществляется путем изменения отношения $(R_1 + R_2)/R_1$ с помощью настроенного потенциометра R_2 .

Прямое преобразование аналоговой измеренной характеристики (температуры) в цифровой выходной сигнал представляет особый интерес в связи с применением ЭВМ, поскольку отпадает, например, необходимость в дорогостоящих аналого-цифровых преобразователях. Кроме того, передача сигнала в цифровой форме надежнее, чем в аналоговой. На рис. 4.26 представлена простая схема температурно-частотного преобразователя. Датчик температуры $R(T)$ в сочетании с конденсатором C_i образует RC-цепочку с зависящей от температуры постоянной времени для КМОП-мультивибратора CD4047A. Переменная выходная частота f на выводе 13 вычисляется по формуле

$$f = 1 / [2,2 C_i R(T)]. \quad (4.26)$$

Зависимость выходной частоты f от температуры для различных датчиков иллюстрируется на рис. 4.27. Кремниевый датчик температуры КТУ 10 (фирма Siemens) имеет почти линейную характеристику, в отличие от терморезисторов с отрицательным ТКС и диодов с внутренним униполярным барьером (BBD), включаемых встречно для компенсации температурной зависимости сопротивления.

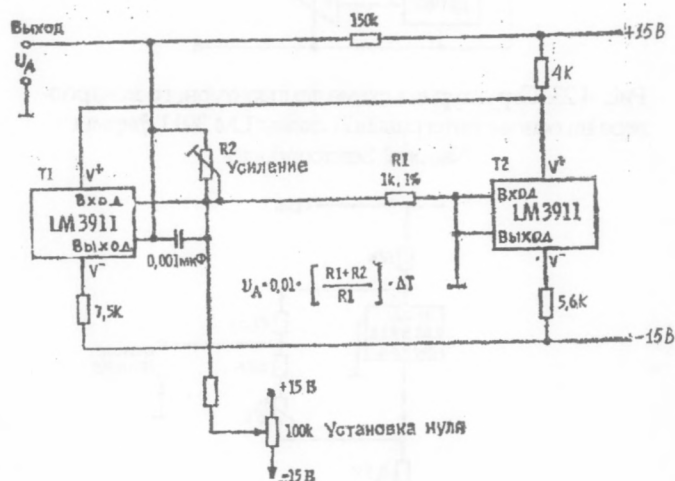


Рис. 4.25. Измерение разности температур двумя датчиками LM 3911

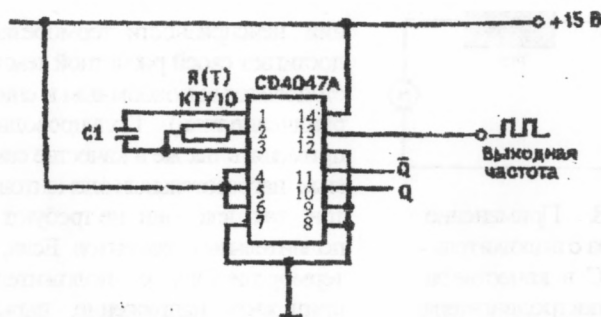


Рис. 4.26. Температурно-частотный преобразователь, состоящий из терморезистора (например, КТУ 10) и КМОП-мультивибратора (CD 4047A)

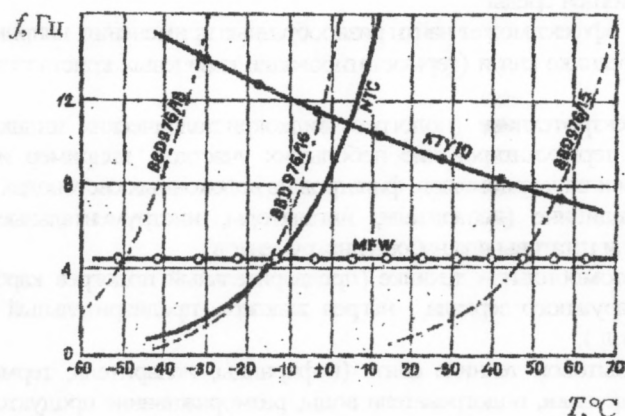


Рис. 4.27. Зависимость выходной частоты f от температуры для различных датчиков:

NTC – терморезистор с отрицательным ТКС; MFW – металлопленочный резистор; BBD – диод с внутренним униполярным барьером

Датчики используют для защиты электродвигателей от перегрузки или как защитные датчики механизмов. Если, например, терморезистор с положительным ТКС включен последовательно с потребителем тока (например, с электродвигателем), как показано, на рис. 4.28, то при нормальном режиме работы через электродвигатель проходит оптимальный ток и сопротивление терморезистора в этом режиме незначительно.

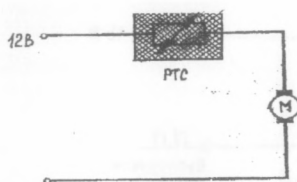


Рис. 4.28. Применение резистора с положительным ТКС в качестве защиты электродвигателя (М) от перегрузок

При возрастании тока в случае возникновения неисправности терморезистор быстро достигает своей расчетной температуры, т.е. становится высокоомным и снижает ток (ограничение тока). Полупроводники можно применять так же в качестве саморегулируемых нагревательных элементов и термостатов, так как они не требуют никаких дополнительных элементов. Если, например, к терморезистору с положительным ТКС приложить напряжение, вызывающее его нагрев до температуры выше расчетной, то происходит скачкообразное изменение температуры. В равновесном состоянии, т.е.

когда подводимая электрическая энергия равна отводимой тепловой энергии, устанавливается постоянная температура, не зависящая от температуры окружающей среды

Этот эффект может найти разнообразные применения, например:

- в технике связи (термостатирование кварцевых кристаллов, диодов и т.д.);
- электротехнике (подогрев жидкокристаллических индикаторов и приборов, термостатирование небольших участков, например интегральных схем, жидких кристаллов, фильтров на волоконных световодах и т.д.);
- медицине (испарители, ингаляторы, инструментальные шкафы, футляры или штативы для набора инструментов);
- автомобильной технике (предварительный подогрев карбюратора, обогрев наружного зеркала, нагрев жиклера, предварительный подогрев воздуха и т.д.);
- в бытовой технике связи (кефирницы, испарители, термостатированные подставки, подогреватели воды, размораживание продуктов, подогреватели детского питания, нагреватели биметаллических выключателей, пистолет для горячей склейки, бигуди и т.д.).

5. ДАТЧИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Среди датчиков магнитного поля различают датчики трех типов, использующие различные физические эффекты, а именно: магниторезистивные датчики, датчики Холла и датчики Виганда.

В общем случае датчики магнитного поля отличаются простотой устройства и надежностью. Благодаря таким свойствам они нашли широкое применение в автомобилях и бытовой технике. Магнитные датчики удобно и целесообразно использовать для измерения положения, скорости вращения, давления и линейной скорости.

5.1. Магниторезистивные датчики

Некоторые ферромагнитные материалы, например пермаллой (80 % Ni и 20 % Fe), изменяют свое электрическое сопротивление при воздействии магнитного поля. Степень этого изменения зависит от величины напряженности магнитного поля и угла между вектором напряженности и направлением тока. С помощью современной тонкопленочной технологии можно изготовить небольшие и очень дешевые магниторезистивные датчики.

Они состоят из резистивного элемента в форме меандра (рис. 5.1) с сопротивлением от 30 Ом до 1 кОм. Поскольку получать сигнал с помощью таких датчиков наиболее целесообразно в мостовой схеме, в датчике располагают две меандровые структуры (A/B) различной ориентации.

На рис. 5.2 продемонстрирована возможность применения такого датчика для измерения скорости вращения. Магнит, установленный на оси вращения, при каждом обороте проходит один раз мимо магниторезистивного датчика, вызывая изменение его сопротивления. Это изменение сопротивления с помощью схемы, показанной на рис. 5.3, преобразуется в изменение напряжения U_A (рис. 5.4).

Зависимость выходного напряжения сигнала от напряженности поля или угла поворота показана на рис. 5.5.

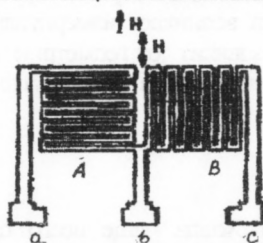


Рис. 5.1. Чувствительный элемент магниторезистивного датчика

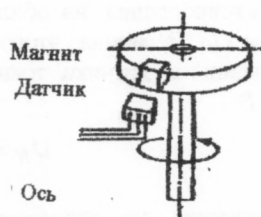


Рис. 5.2. Устройство для измерения скорости вращения или числа оборотов датчика с магниторезистивным элементом

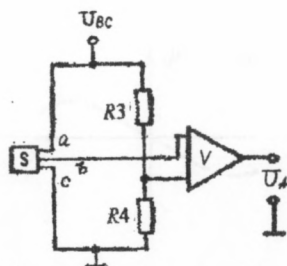


Рис. 5.3. Измерительная схема

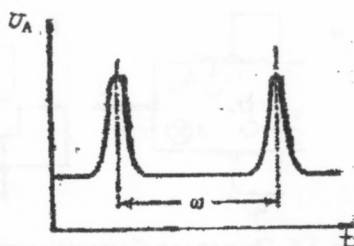


Рис. 5.4. Форма сигнала на выходе

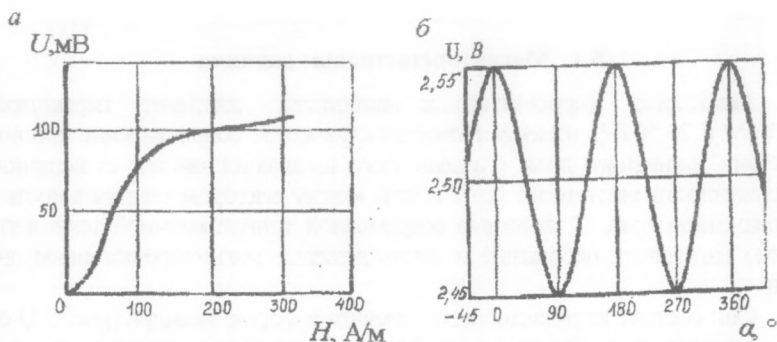


Рис 5.5. Зависимость выходного напряжения сигнала U от напряженности H магнитного поля (а) и угла поворота (б)

5.2. Датчики Холла

Датчики магнитного поля, использующие эффект Холла, относятся к активным датчикам, так как они сами вырабатывают измерительное напряжение, связанное с магнитным полем. На рис. 5.6 схематически показаны устройство и принцип действия датчика Холла.

Под действием тока I и магнитной индукции B , векторы которых взаимно перпендикулярны, на обкладках датчика возникает измерительное напряжение U_H . Величина этого напряжения зависит от геометрии (длины l и толщины d) датчика, тока I , коэффициента Холла R_H и магнитной индукции B :

$$U_H = \frac{R_H I B}{d}. \quad (5.1)$$

Материалом для изготовления датчика Холла чаще всего служат кремний, арсенид индия (InAs) и антимонид индия (InSb). Датчик Холла из арсенида индия, например, при магнитной индукции $B = 1T$ и токе 0,1 А имеет выходное напряжение около 0,5 В.

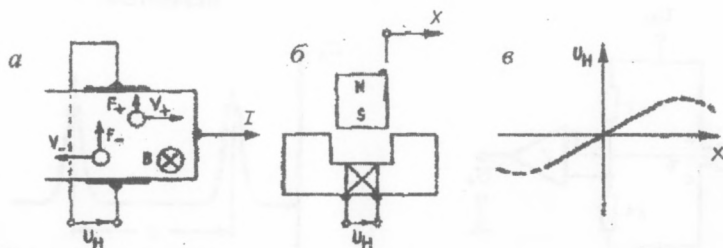


Рис. 5.6. Принцип действия холловского чувствительного элемента (а), устройство датчика перемещения с холловским элементом (б) и изменение сигнала в зависимости от перемещения (в)

При смещении постоянного магнита по отношению к датчику Холлиа (рис. 5.6, б) напряжение датчика изменится пропорционально перемещению X . Следовательно, датчики Холлиа можно также использовать как датчики перемещения или положения.

Такой датчик перемещения в соответствующем устройстве (рис. 5.7) можно использовать также для измерения давления. В этом устройстве постоянный магнит расположен на мембране, прогибающейся под действием изменяющегося давления. В результате магнит смещается относительно датчика, что ведет к изменению напряжения.

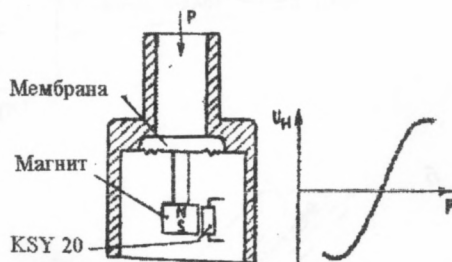


Рис. 5.7. Датчик давления, действие которого основано на смещении постоянного магнита относительно холловского датчика

5.3. Датчики Виганда

Новейшей разработкой в области датчиков магнитного поля является датчик Виганда. Он состоит из предварительно обработанной механически проволоки из сплава «Викалой» (10% V, 52% Co, 38% Fe) диаметром $\approx 0,3$ мм, намотанной в виде катушки длиной 15 мм, имеющей около 1300 витков. Если эту катушку поместить в магнитное поле, то при превышении определенной величины напряженности поля направление намагничивания спонтанно изменится. В результате этого изменения возникает импульс напряжения длительностью ≈ 20 мкс и амплитудой $\approx 2,5$ В.

Достоинствами датчика Виганда являются: отсутствие необходимости в источнике питания, большая величина сигнала (несколько вольт), широкий температурный диапазон применения ($-196 \dots +175^\circ\text{C}$), конструктивная защищенность от коротких замыканий, искробезопасность.

На рис. 5.8, а показано изменение во времени импульса, возникшего в магнитнобистабильной проволоке. Амплитуда и длительность импульсов не зависит от скорости изменения магнитного поля, так что датчики указанного типа могут применяться при скоростях, даже близких к нулю. Поэтому индуктивные методы уступают в таких случаях данному способу измерения.

На рис. 5.8, б проиллюстрировано применение такого датчика для измерения скорости вращения.

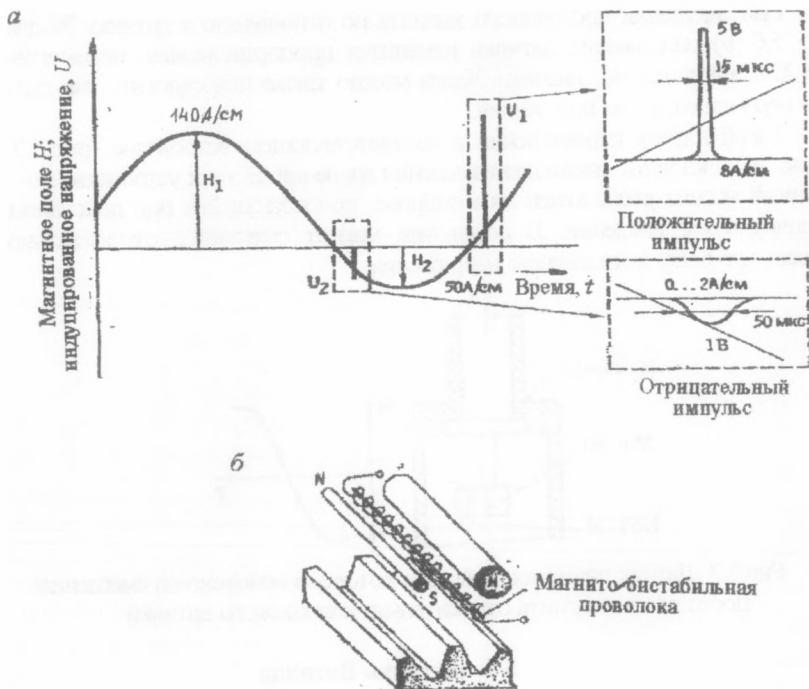


Рис. 5.8. Сигнал датчика положения на основе магнитнобистабильной проволоки (а) и устройство датчика (б)

6. ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

Пьезоэлектрические датчики основаны на использовании пьезоэлектрического эффекта, которым обладают некоторые кристаллы. Пьезоэлектрический эффект был открыт в 1880 г.; сущность его заключается в том, что на гранях некоторых кристаллов при их сжатии или растяжении появляются заряды, подобные поляризационным. В качестве материалов для датчиков применяются кварц, титанат бария, сегнетова соль, турмалин и др. Пьезоэлектрические датчики относятся к датчикам генераторного типа (входная величина — сила, выходная — количество электричества).

Различают прямой и обратный пьезоэлектрический эффект. Прямой пьезоэлектрический эффект состоит в том, что под влиянием механических напряжений на гранях некоторых кристаллов появляются электрические заряды. При снятии усилий кристалл возвращается в ненаэлектризованное состояние. Обратный пьезоэлектрический эффект заключается в том, что

при внесении пьезокристалла в электрическое поле, силовые линии которого совпадают с направлением пьезоэлектрической оси, происходит изменение геометрических размеров кристалла (сжатие или растяжение).

Прямой пьезоэлектрический эффект используется для измерений быстро протекающих динамических процессов (так как пьезоэлектрические датчики обладают высокой собственной частотой), например, давления в стволах различных орудий при выстреле, давления газов в двигателях внутреннего сгорания, давления звуковых колебаний. Большое применение получили пьезоэлектрические адаптеры (звукоусилители), манометры, вибраторы для измерения вибраций машин, измерители ускорений (акселерометры) и многие другие устройства.

Обратный пьезоэлектрический эффект нашел применение, например, в ультразвуковых генераторах, с помощью которых можно произвести очистку поверхности изделий из металла, стекла и керамики, пайку и лужение металлов, поверхность которых на воздухе быстро покрывается окисной пленкой, препятствующей соединению припоя с металлом (например, алюминием), ультразвуковых дефектов в деталях, залегающих на большой глубине, например раковин, включений из шлака, трещин, и т. п.

Следует отметить, что выходная мощность пьезодатчика очень мала, поэтому на его выходе должен быть включен электронный усилитель с большим входным сопротивлением. Усилитель и датчик соединены экранированным кабелем.

Пьезоэлектрические датчики обладают следующими достоинствами: малыми габаритами, простотой конструкции, надежностью в работе, возможностью измерения быстропеременных нагрузок.

В кристалле кварца имеются следующие оси симметрии (рис. 6.1): Z — оптическая, X — электрическая (ось, проходящая через ребра шестигранной призмы нормально к оптической оси); Y — механическая, или нейтральная (нормальная к граням). Если из кристалла кварца вырезать соответствующим образом ориентированный по отношению к осям кристалла параллелепипед, то под влиянием сил F_x и F_y , действующих перпендикулярно оптической оси, на плоскостях, перпендикулярных электрической оси, появятся заряды. Сжатие или растяжение вдоль оси Z не вызывает пьезоэлектрического эффекта.

Под действием силы сжатия F_x вдоль электрической оси X на каждой из граней параллелепипеда, перпендикулярных оси X ,

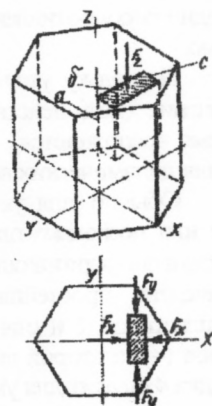


Рис. 6.1. Пьезочувствительный датчик

параллелепипеда, перпендикулярных оси X , появляются электрические заряды (так называемый *продольный пьезоэффект*). Величина этих зарядов q_x не зависит от геометрических размеров кристалла и определяется зависимостью

$$q_x = k_n F_x, \quad (6.1)$$

где k_n — пьезомодуль материала.

Пьезомодуль характеризует чувствительность пьезоэлектрического материала и определяет величину электрического заряда, возникающего при приложении определенной силы, равной 1 Н.

При действии растягивающего усилия F_y вдоль механической оси Y возникают заряды только на гранях $b - a$, перпендикулярных электрической оси X , однако знак зарядов будет противоположным по сравнению с усилием, приложенным вдоль оси X . В этом случае величина зарядов будет зависеть от геометрических размеров кристалла b и c (см. рис. 6.1):

$$q_y = -k_0 F_y (b/c), \quad (6.2)$$

где k_0 имеет то же численное значение, что и в формуле (6.1). Этот эффект получил название *поперечного пьезоэффекта*.

Для повышения чувствительности датчика следует увеличивать отношение b/c , где b и c — грани кристалла, перпендикулярные осям X и Y .

Пьезоэлектрические датчики для статических измерений не используются, так как заряд, возникающий на гранях пьезоэлемента под действием усилий, имеет очень малую величину, что создает опасность разряда его через утечку изоляции; следовательно, заряд на гранях пластин может сохраниться сколь угодно долго при условии бесконечно большого входного сопротивления измерительной цепи, а это практически невыполнимо.

Поскольку утечка зарядов при динамических процессах имеет малое значение (под действием переменных сил количество электричества все время восполняется), то пьезодатчики в основном применяются для измерения динамических величин.

Обычно для увеличения чувствительности пьезодатчика применяют две или несколько пластинок, соединенных параллельно; при этом заряды одноименно заряжающихся плоскостей должны складываться. На рис. 6.2 приведена простейшая схема пьезоэлектрического датчика, состоящего из пластинок 1 и станиолевых прокладок 3, которые служат одним из выводов (-), а второй вывод имеет контакт с корпусом 2. Изоляционная прокладка 4 служит для уменьшения утечки зарядов.

На рис. 6.3 показан разрез пьезоэлектрического датчика силы. Действие датчика основано на преобразовании силы сжатия пьезокристалла в изменение электрических зарядов на его гранях. Измеряемое усилие F воспринимается мембраной 1, которая одновременно служит дном корпуса пьезодатчика. Чувствительным элементом датчика являются пластинки 2.

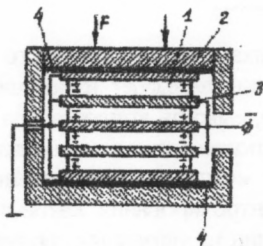


Рис. 6.2. Схема пьезоэлектрического датчика

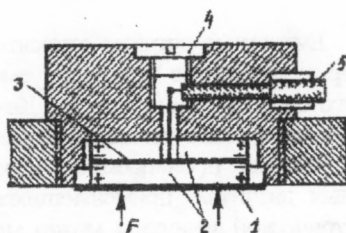


Рис. 6.3. Устройство пьезоэлектрического датчика

из кварца, соединенные параллельно (для повышения чувствительности).
 В качестве положительного электрода служат наружные обкладки кварцевых пластин. Средняя обкладка изолируется относительно корпуса с помощью кварца, обладающего большим удельным сопротивлением. Отрицательный потенциал, снимаемый с латунной фольги 3, подается на вход электронной измерительной схемы через соединительный экранированный кабель 5.
 В корпусе предусмотрено отверстие для удобства монтажа жилы соединительного кабеля с выводом от фольги. Сверху отверстие закрывается специальной пробкой 4.

Чувствительность пьезодатчика при параллельном соединении пластинок вычисляется по формуле

$$S_d = k_0 / (C_{\text{вх}} / n + C_0), \quad (6.3)$$

где k_0 — пьезоэлектрическая постоянная (пьезомодуль); n — число параллельно соединенных пластин; C_0 — емкость одной пластины (датчика); $C_{\text{вх}}$ — емкость измерительной цепи (емкость проводов, соединительного кабеля, промежутка сетка — катод усилительной лампы и др.).

Емкость датчика определяется как емкость плоскопараллельного конденсатора (9.1).

Наиболее широко в пьезодатчиках применяется кварц. Пьезомодуль кварца $k_q = 2,3 \cdot 10^{-2}$ Кл/Н; диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 40 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; модуль упругости $E = (7 + 10) \cdot 10^{10}$ Па. Значение пьезомодуля при изменении температуры до 400°C изменяется незначительно, однако с повышением температуры (400°C и выше) значение k_q быстро уменьшается и при температуре $573 - 576^\circ\text{C}$ кристалл кварца теряет свои основные свойства.

Сегнетова соль имеет пьезомодуль $k_s = 300 \cdot 10^{-2}$ Кл/Н, рабочий температурный диапазон от -15 до $22,5^\circ\text{C}$. Малая механическая прочность, малое значение удельного сопротивления и очень сильная гигроскопичность ограничивают применение сегнетовой соли. При изменении температуры и влажности сегнетова соль изменяет свои параметры.

7. ЕМКОСТНЫЕ ДАТЧИКИ

Емкостные датчики относятся к датчикам параметрического типа, в которых изменение контролируемой величины вызывает изменение емкостного сопротивления датчика. Как известно, емкость конденсатора зависит от формы и геометрических размеров электродов (площади обкладок), диэлектрической проницаемости и расстояния между его обкладками. В различных датчиках, применяющихся для контроля какой-либо неэлектрической величины, может меняться один из указанных параметров. С помощью емкостных датчиков измеряют геометрические размеры изделий, влажность изоляционных материалов, от которой зависит ε (относительная диэлектрическая проницаемость), и определяют состав изоляционного материала. Они получили также распространение в телемеханике — для преобразования механического перемещения (линейного или углового) в изменение электрической емкости конденсатора. Чаще всего емкостный датчик представляет собой плоский конденсатор, состоящий из двух пластин или более, между которыми помещается диэлектрик.

Как известно, емкость плоскопараллельного конденсатора определяется по формуле

$$C = 0,89 \varepsilon S d, \quad (7.1)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость среды между обкладками, $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума; ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость между обкладками (для воздуха $\varepsilon_r = 1$ и, следовательно, $\varepsilon = \varepsilon_0$)); S — площадь перекрытия обеих пластин, см²; d — зазор между пластинами, мм.

Из (7.1) видно, что изменение емкости можно достигнуть путем изменения значения одной из величин: ε , S или d . Таким образом, каждую из величин, входящих в (7.1), можно принять за входную (остальные параметры остаются постоянными) и получить соответствующий тип датчика с переменной емкостью на выходе.

В некоторых конструктивных исполнениях роль одного из рабочих электродов (обкладок) может выполнять часть контролируемого устройства, например кулачок, мембрана, корпус подвижного состава, материал на ленте транспортера, тело человека, приближающееся к объекту, и др.

Преимущества емкостных датчиков:

- высокая чувствительность, поэтому они применяются для измерения быстропеременных параметров, давления, вибрации, ускорения, уровня жидкости, состава смеси, перемещений первичных измерителей, обладающих малым собственным моментом, и др.;

- малый вес и габариты,

- небольшая величина силы взаимодействия между пластинами, обусловленная электрическим полем, в некоторых случаях этой величиной

можно пренебречь;

- простота приспособления формы конденсатора к различным задачам, что позволяет с помощью одной измерительной схемы производить различные измерения неэлектрических величин.

Недостатки емкостных датчиков:

- необходимость усиления снимаемого сигнала (наличие усилителей напряжения на выходе);
- необходимость тщательной экранировки датчика от влияния паразитных емкостей и посторонних электрических полей;
- необходимость применения источника напряжения повышенной частоты (от 1 кГц до десятков мегагерц).

На низких частотах реактивное сопротивление датчика $X_c = 1/\omega C$ весьма велико, что не позволяет применять датчик для целей измерения. Так, например, если емкостный датчик емкостью C от 100 до 200 пФ включить в сеть с частотой $f = 50$ Гц, то его емкостное сопротивление (для 100 пФ) составит

$$X_{C1} = 1 / (2\pi f C_1) = 1 \cdot 10^{12} / 6,28 \cdot 50 \cdot 100 \approx 31 \cdot 10^6 \text{ Ом.} \quad (7.2)$$

Полученные расчетные величины показывают, что емкость C имеет значение порядка нескольких десятков пикофард, а емкостное сопротивление X_c на промышленной частоте по своей величине соизмеримо с сопротивлением изоляции. При такой большой величине емкостного сопротивления на работу схемы, в которую включается датчик, будут оказывать влияние токи утечки и токи наводок (сигналы помех, возникающие от влияния паразитных параметров, становятся соизмеримыми с рабочим сигналом емкостного датчика). Для уменьшения емкостного сопротивления необходимо увеличивать емкость конденсатора и частоту источника питания. Иногда для увеличения емкости используются датчики, состоящие из ряда пластин, которые погружаются в диэлектрик с большой диэлектрической проницаемостью ϵ . Для уменьшения влияния токов утечки и токов наводок применяют экранированные провода (кабели с двойным экраном).

При измерениях различных неэлектрических величин могут возникнуть погрешности, вызванные влиянием температуры и влажности. Под влиянием температуры могут изменяться геометрические размеры датчика, а также диэлектрическая проницаемость (в датчиках с твердым и жидким диэлектриком). Эти погрешности могут быть сведены к минимуму путем выбора соответствующей конструкции датчика (правильный выбор геометрических размеров деталей с учетом их температурных коэффициентов расширения). В значительной степени температурная погрешность снижается при использовании дифференциальных измерительных схем.

При выборе конструкции датчика необходимо учитывать минимальное расстояние между пластинами во избежание электрического про-

боя конденсатора. Минимальное расстояние воздушного промежутка принимают равным порядка 30 мкм. Можно значительно увеличить напряжение питания, помещая между обкладками конденсатора тонкую слюдяную пластинку.

7.1. Типы емкостных датчиков

Датчик по типу *плоского конденсатора* (две параллельные пластины) представлен на рис. 7.1. Если связать подвижную пластину 2 с объектом измерения, а пластину 1 оставить неподвижной, то емкость конденсатора будет изменяться с изменением расстояния d между пластинами. Такой

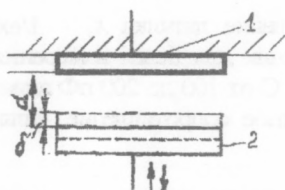


Рис. 7.1. Плоский конденсатор

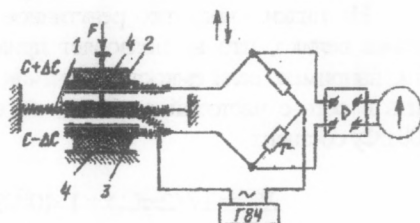


Рис. 7.2. Дифференциальный датчик с изменением зазора

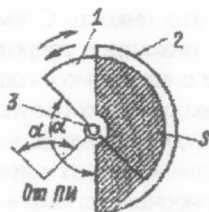


Рис. 7.3. Датчик угловых перемещений

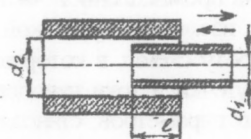


Рис. 7.4. Цилиндрический датчик для измерения перемещения

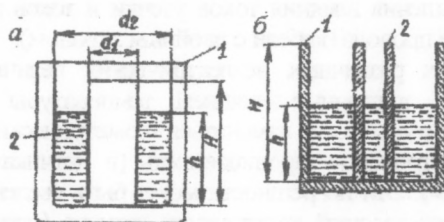


Рис. 7.5. Датчики для измерения уровня жидкости с цилиндрическим (а) и плоским (б) конденсатором

датчик применяется для измерения малых приращений — до 1 мм.

Переменной величиной в данном датчике является расстояние между пластинами. Зависимость емкости C (пФ) от величины смещения δ определяется выражением

$$C = 0,89 \varepsilon_r S(d - \delta), \quad (7.3)$$

где δ — величина смещения, т. е. величина изменения зазора между пластинами, мм; d — зазор между пластинами при $\delta = 0$, мм; S — площадь пластин, см²; ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость среды между обкладками.

Дифференциальный датчик с изменением зазора (рис. 7.2). Для повышения точности и чувствительности, а также с целью уменьшения влияния действия механических сил емкостный датчик обычно делается дифференциальным, его емкости включаются в соседние плечи мостовой схемы. Такой датчик дает возможность контролировать не только величину перемещения, но и направление.

Конструкция представляет собой конденсатор с металлической обкладкой 1, помещенной в середине датчика, на которую действует контролируемая величина F . Обкладка 1 закреплена на упругой подвеске с малой жесткостью и может перемещаться параллельно самой себе под воздействием усилия. Две другие обкладки 2 и 3 тщательно изолированы от корпуса специальными прокладками 4. При отсутствии механического воздействия F обкладка 1 занимает симметричное положение, при этом емкости двух половин конденсатора $C_{1,3}$ и $C_{1,2}$ одинаковы и равны C . При воздействии измеряемой неэлектрической величины F обкладка 1 перемещается и емкости верхней и нижней частей датчика получают приращение с разными знаками: $C_{1,3} = C + \Delta C$ и $C_{1,2} = C - \Delta C$. Эти емкости включаются в смежные плечи мостовой схемы, благодаря чему чувствительность схемы увеличивается в два раза. Силы, действующие между парами обкладок, направлены встречно, т. е. взаимно компенсируются. Уменьшение или увеличение зазора вызывает пропорциональное уменьшение или увеличение напряжения между обкладками, а сила, действующая между ними, остается неизменной.

Измерительный мост питается от генератора высокой частоты ГВЧ порядка $10^4 - 10^5$ Гц. При изменении положения подвижной обкладки равновесие моста нарушается и увеличивается напряжение в диагонали моста, которое усиливается усилителем. Прибор, включенный на выходе усилителя, покажет изменение контролируемой неэлектрической величины.

В качестве расчетной формулы для подсчета величины емкости датчика можно принять формулу (7.3) для плоскопараллельного конденсатора.

Датчик угловых перемещений (рис. 7.3) используют для контроля незначительных угловых перемещений (в телемеханике), для передачи показаний стрелочных измерительных приборов.

Подвижная обкладка (пластина) 1, жестко скрепленная с валом 3,

может легко поворачиваться относительно неподвижной обкладки (пластины) 2 так, что расстояние между пластинами остается неизменным. Рабочая площадь такого датчика (заштрихованная) зависит от угла поворота α обкладки 1. Для того чтобы увеличить емкость датчика, применяют систему, состоящую из нескольких неподвижных и подвижных пластин. Примером такого датчика может быть обычный воздушный конденсатор переменной емкости, используемый в радиотехнике.

Зависимость емкости датчика от взаимного положения подвижных и неподвижных обкладок определяется выражением

$$C = 0,89 S_n (n-1) d, \quad (7.4)$$

где S_n — площадь взаимодействия между подвижной и одной из неподвижных пластин при угле поворота $\alpha = 0$, см²; n — количество неподвижных и подвижных пластин; d — зазор между пластинами, мм.

Если пластины имеют форму половины круга (см. рис. 7.3), а ось вращения подвижных пластин находится в центре окружности обеих пластин, то емкость датчика в зависимости от угла поворота α будет равна

$$C = 0,89 S_{\max} (n-1) \alpha (d/180), \quad (7.5)$$

где α — угол поворота подвижной пластины относительно неподвижной (от 0 до 180° и обратно); S_{\max} — площадь взаимодействия пластин при $\alpha = 180^\circ$ (при полностью вдвинутых пластинах), см².

Чувствительность датчика (пФ/1°) для этого случая находят путем дифференцирования выражения (7.5), т. е.

$$S_d = 0,89 S_{\max} (n-1) (d/180). \quad (7.6)$$

Цилиндрический датчик для измерения перемещений (рис. 7.4). Емкость датчика в зависимости от осевого перемещения внутреннего цилиндра

$$C = k / [2 \ln (d_2/d_1)], \quad (7.7)$$

где l — длина перекрываемой части обкладок конденсатора, см; d_2 , d_1 — диаметры соответственно внешней и внутренней обкладок, мм; ε — диэлектрическая проницаемость среды.

Чувствительность такого датчика (пФ/см) определяется дифференцированием выражения (7.7) по переменной величине l , т. е.

$$S_d = \varepsilon / [2 \ln (d_2/d_1)]. \quad (7.8)$$

Цилиндрический датчик используется для измерения перемещений более 1 мм. Преимуществом данного датчика является возможность получения большей емкости при меньших габаритах, чем у других типов.

Датчики для измерения уровня жидкости (рис. 7.5) используются в качестве емкостных топливомеров, с помощью которых измеряются уров-

ни жидкостей, не проводящих ток (керосина, бензина, масла и др.), причем датчиком топливомеров может служить цилиндрический (рис. 7.5, а) или плоский (рис. 7.5, б) конденсатор, помещаемый внутрь топливного бака.

Емкостный датчик, показанный на рис. 7.5, а, выполнен в виде цилиндрического конденсатора, состоящего из металлической трубки 1 (бака) и металлического стержня 2, погруженного в жидкость в зависимости от изменения высоты уровня жидкости изменяется емкость конденсатора. Общая емкость конденсатора может быть определена как емкость двух параллельно соединенных конденсаторов

$$C = C_1 + C_2, \quad (7.9)$$

где C_1 — емкость нижней части, заполненной жидкостью, уровень h которой изменяется, C_2 — емкость верхней части высотой $H-h$, заполненной воздухом.

Существуют *емкостные топливомеры* для измерения уровня электропроводящих жидкостей. На рис. 7.6 изображен датчик измерения уровня токопроводящей жидкости. В этом датчике центральный стержень (внутренний цилиндр) 2 покрыт тонким электроизоляционным слоем 3. Внутренний цилиндр 2 помещается в наружный цилиндр (трубку) 1. Стержень 2 изолирован от трубки 1 изоляционным слоем 4. С помощью такого датчика можно измерять уровни химически активных жидкостей (например, кислот) в жидкостных реактивных двигателях.

Емкостные датчики имеют небольшие габариты и просты по устройству, что позволяет без особых трудностей установить в одном баке два или четыре датчика, соединенных параллельно. При этом получается меньшая зависимость показаний от различных положений датчика (например, зависимость показаний от кренов или от изменения угла тангажа самолета).

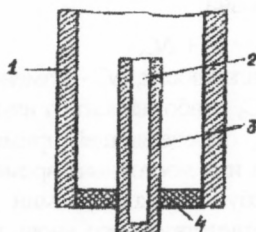


Рис. 7.6. Емкостный датчик для измерения уровня токопроводящей жидкости

7.2. Емкостные датчики влажности

Недорогими и прежде всего простыми в обращении являются датчики влажности емкостного типа. Они состоят из специальной пленки с напыленным с двух сторон слоем золота (рис. 7.7). Таким образом, пленка служит диэлектриком плоского конденсатора. С помощью соответствующей измерительной схемы, это изменение емкости можно преобразовать в постоянное напряжение. Зависимость емкости датчика от влажности воздуха приведена на рис. 7.8.



Рис. 7.7. Принципиальное устройство диэлектрического датчика влажности

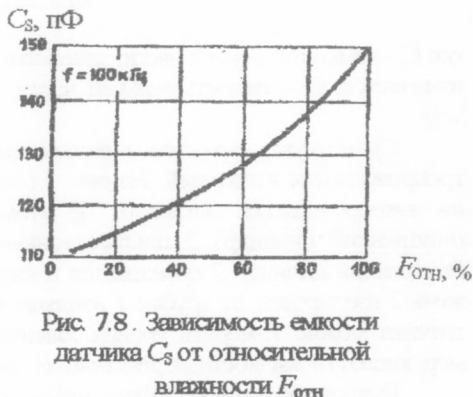


Рис. 7.8. Зависимость емкости датчика C_s от относительной влажности $F_{отн}$

Поскольку эта характеристика изогнута (нелинейна), непосредственную индикацию можно осуществить только при соответствующим образом откалиброванной шкале или с помощью дополнительно включенной схемы линеаризации.

Общая емкость датчика равна

$$C_s = C_0 + \Delta C, \quad (7.10)$$

где C_0 — емкость при нулевой влажности, ΔC — изменение емкости из-за наличия влаги. Емкость датчика C_s слабо зависит от измерительной частоты.

Важной характеристикой, определяющей применимость датчика, является его время срабатывания или постоянная времени. При резком изменении влажности датчику требуется около 2 мин для достижения 90% окончательного показания, соответствующего вновь установившейся влажности.

Изменения емкости можно, естественно, как и изменения сопротивления, измерять с помощью измерительного моста. Соответствующая схема показана на рис. 7.9. Она состоит из моста для измерения емкости с датчиком влажности в качестве активного элемента. Мост питается переменным напряжением с частотой около 100 кГц. С помощью подстроеч-

ного конденсатора C_A выходное напряжение U_o устанавливается на нуль при $\Delta C = 0$. При изменении емкости ΔC выходное напряжение U_o служит мерой этого изменения и соответственно изменения влажности.

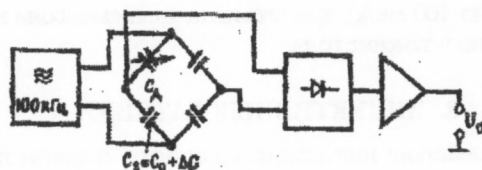


Рис. 7.9. Измерительная схема датчика влажности с емкостным мостом

Для простых конструкций датчиков получили распространение схемы, работающие по разности импульсов. Она состоит из двух мультивибраторов M_1 и M_2 , причем M_1 синхронизирует M_2 . При $\Delta C = 0$ длительность импульсов обоих мультивибраторов одинакова ($t_1 = t_2$). Если же емкость датчика изменится ($\Delta C \neq 0$), то между двумя выходами 1 и 2 возникнет «разностный» импульс длительностью $t_3 = t_2 - t_1 \sim \Delta C$.

При условии, что мультивибраторы M_1 и M_2 в сущности одинаковы (например, мультивибраторы типа HEF 4001B, выполненные на одном кристалле по технологии LOC MOS), а емкость датчика имеет такой же температурный коэффициент, как и подстроечный конденсатор C_A , отношение t_3/T не зависит от изменений температуры.

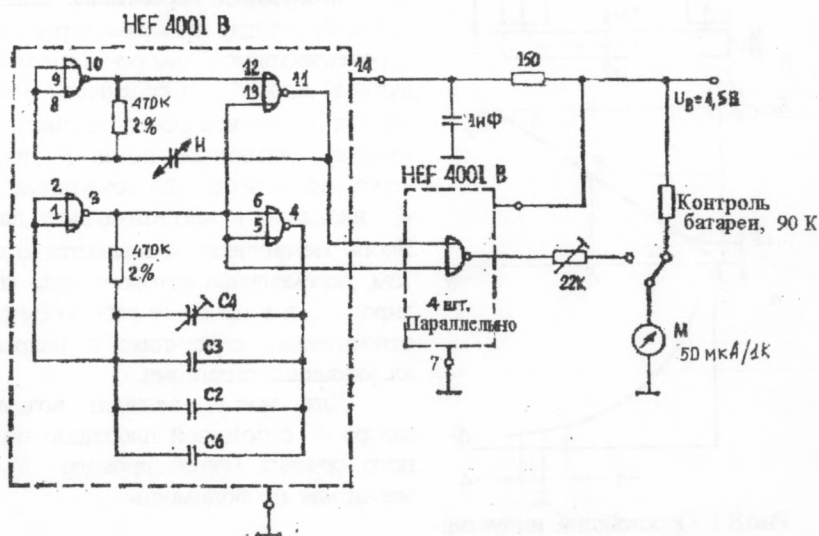


Рис. 7.10. Полная измерительная схема, работающая по разности импульсов

Разумеется, напряжение питания должно быть стабилизировано, так как оно непосредственно входит в результат измерений (U_0).

На рис. 7.10 изображена простая измерительная схема без стабилизации напряжения и без линеаризации. Поскольку ток этой схемы чрезвычайно мал (около 100 мкА), три элемента типа «миньон» могут обеспечить питание примерно в течение года.

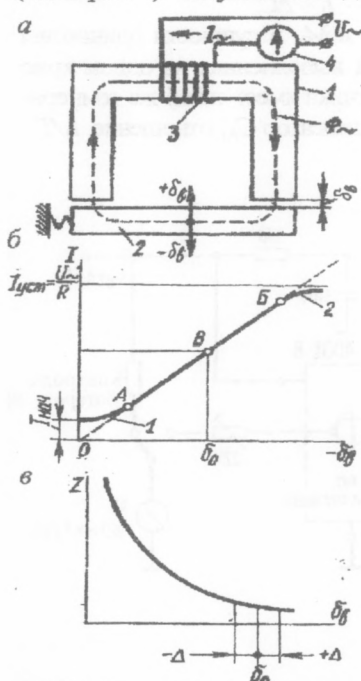
8. ИНДУКТИВНЫЕ ДАТЧИКИ

Принцип действия индуктивных датчиков основан на изменении индуктивности L (коэффициента самоиндукции) или взаимоиנדуктивности обмотки с сердечником вследствие изменения магнитного сопротивления R_M магнитной цепи датчика, в которую входит сердечник.

8.1. Принцип действия индуктивного датчика.

Основные соотношения

Рассмотрим принцип действия и основные зависимости простейшего (одинарного) индуктивного датчика ОИД на одном сердечнике, изображенного на рис. 8.1, а. На сердечнике 1



располагается обмотка 3, подключаемая к источнику переменного тока через сопротивление нагрузки (сопротивление измерительного прибора) 4. Ток I в обмотке 3 возбуждает переменный магнитный поток Φ . Между полюсами сердечников и перемещающимся якорем 2 имеется воздушный зазор δ_δ . Сердечник 1 и якорь 2 образуют магнитопровод датчика. Переменный магнитный поток Φ проходит через них и через два воздушных зазора δ_δ , входящих в магнитную цепь датчика. Якорь механически связывается с объектом, перемещение которого надо контролировать, и в процессе работы смещается относительно сердечника в направлениях, указанных стрелками.

Для малых величин воздушного зазора δ с большой площадью поперечного сечения магнитопровода $S_M = S_\delta$ магнитная проводимость

$$\Delta = \mu_0 S_M / (2 \delta). \quad (8.1)$$

Рис. 8.1. Простейший индуктивный датчик (а) и его характеристики (б, в)

Если пренебречь сопротивлением магнитопровода, которое для ненасыщенных систем мало по сравнению с магнитным сопротивлением воздушного зазора, то индуктивность

$$L = \Lambda \delta w^2 = \mu_0 S_M w^2 / (2 \delta). \quad (8.2)$$

Индуктивное сопротивление обмотки

$$X_L = \omega L = \omega \mu_0 S_M w^2 / (2 \delta), \quad (8.3)$$

где ω — угловая частота.

Сопротивление электрической цепи преобразователя

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}, \quad (8.4)$$

где $R = R_{об} + R_{н}$ ($R_{об}$ — активное электрическое сопротивление обмотки, $R_{н}$ — сопротивление нагрузки).

Выходное напряжение преобразователя

$$U_{вых} = IR_{н} = UR_{н} / \sqrt{R^2 + (\omega \mu_0 S_M w^2 / (2 \delta))^2}. \quad (8.5)$$

В большинстве конструкций индуктивных преобразователей $X_L \gg R$. В этом случае

$$U_{вых} = 2UR_{н} \delta / (\omega \mu_0 S_M w^2). \quad (8.6)$$

В полученном выражении переменной величиной является δ .

В индуктивном датчике имеем следующую цепь преобразований:

$$F \rightarrow \delta_b \rightarrow R_{\Sigma} \rightarrow L \rightarrow X_L \rightarrow Z \rightarrow I_{\Sigma},$$

где δ_b — длина воздушного зазора, R_{Σ} — магнитное сопротивление цепи (сердечника, якоря и двух воздушных зазоров); L — индуктивность катушки датчика; X_L — индуктивное сопротивление катушки датчика; Z — полное сопротивление катушки датчика.

На рис. 8.1, б показана характеристика $I_{\Sigma} = f(\delta_b)$ простейшего датчика — зависимость выходной величины датчика от входной в установившемся режиме (т. е. когда переходные процессы, возникшие в электрической цепи от перемещения якоря, закончились). Эта зависимость представляет собой статическую характеристику датчика и является в общем случае нелинейной функцией. Участок А — Б на рис. 8.1, б является рабочим участком статической характеристики датчика.

В большинстве конструкций индуктивных датчиков при ненасыщенном магнитопроводе величина воздушного зазора такова, что магнитное сопротивление зазора значительно больше магнитного сопротивления стального магнитопровода, т. е. $R_{м\delta} \gg R_{м.ст}$. При этом активное сопротивление катушки значительно меньше индуктивного сопротивления, т. е. $R \ll \omega L$.

После упрощений характеристика датчика получается линейной (штриховая линия на рис. 8.1, б). Как видно из рис. 8.1, б, идеализированная характеристика 1 датчика прямолинейна, тогда как реальная характеристика 2 имеет два нелинейных участка (верхний и нижний — «загибы»).

Нижний участок («загиб») характеризуется наличием магнитного сопротивления сердечника и якоря. При очень малых зазорах они оказываются того же порядка, что и сопротивление зазора ($R_{\text{ст}} \neq 0$), поэтому пренебрегать им нельзя. Верхний участок («загиб») обусловлен наличием активного сопротивления обмотки, которое ограничивает нарастание тока в цепи $I_{\text{уст}} = U_{\text{н}}/R$ (когда активное сопротивление становится сравнимым с индуктивным ($R \neq 0$) при больших зазорах).

Величину первоначального зазора δ_0 нужно выбирать в середине линейного участка характеристики датчика (см. рис. 8.1, б, точка В).

Чувствительность датчика

$$S_d = \frac{\Delta Z / Z}{\Delta \delta_B}, \quad (8.7)$$

где $\Delta Z / Z$ — относительное изменение полного сопротивления катушки датчика; $\Delta \delta_B$ — приращение воздушного зазора;

$$S_d = 1/\delta_{B0}, \quad (8.8)$$

где δ_{B0} — начальный воздушный зазор, характеризующий выбор точки. Это выражение показывает, что с увеличением зазора чувствительность датчика резко уменьшается. Чувствительность датчика определяется конструктивными параметрами $l_{\text{ст}}$, $\mu_{\text{ст}}$, δ_{B0} .

8.2. Реверсивные индуктивные датчики

Реверсивные индуктивные преобразователи имеют лучшие характеристики по сравнению с нереверсивными, и поэтому получили широкое распространение. Существуют две основные схемы включения реверсивных преобразователей: дифференциальная и мостовая.

Дифференциальные индуктивные датчики (ДИД) получили наибольшее распространение, они представляют собой совокупность двух нереверсивных датчиков и выполняются в виде системы, состоящей из двух магнитопроводов с общим якорем и двумя катушками.

Для ДИД необходимы два отдельных источника питания, для чего обычно используется разделительный трансформатор 5 (рис. 8.2, а).

Выбор формы датчика зависит от конструктивного сочетания датчика с контролируемым устройством.

Применение Ш-образного магнитопровода обусловлено удобством сборки катушки и уменьшением габаритов датчика. На рис. 8.2, а изображен ДИД, который состоит из двух Ш-образных магнитопроводов 1 и 1' с намотанными на них в противоположных направлениях катушками 3 и 3', жестко закрепленными относительно друг друга, и расположенного между ними подвижного якоря 2. Для питания ДИД используют трансформатор 5 с выводом средней точки на вторичной обмотке. Между этим выводом и об-

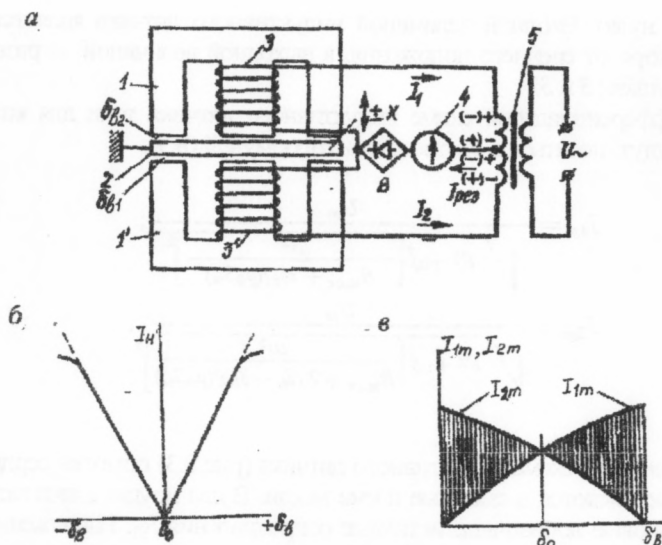


Рис.8.2. Дифференциальный индуктивный датчик (а) и его характеристики (б, в)

шим концом обеих катушек включается прибор 4. При среднем положении якоря, когда воздушные зазоры с обеих сторон одинаковы, индуктивные сопротивления обеих катушек 3 и 3' одинаковы, следовательно, величины токов в катушках равны ($I_1 = I_2$) и результирующий ток в приборе равен нулю. При небольшом отклонении якоря в ту или иную сторону под действием контролируемой величины X (например, вверх) зазор между якорем и одним из сердечников (катушка 3) уменьшается, а между другим сердечником (катушка 3') и якорем увеличивается, при этом индуктивное сопротивление катушки 3 возрастает, а катушки 3' уменьшается. Прибор 4 в этом случае регистрирует ток, равный разности токов в обмотках и являющийся функцией смещения якоря от среднего положения. Разность токов обычно регистрируется с помощью микитоэлектрического прибора 4 (микроамперметра) с выпрямительной схемой B на входе (рис. 8.2, а).

Выходная характеристика датчика для измерительных приборов с нулем в начале шкалы показана на рис. 8.2, б. Из характеристики видно, что полярность выходного тока остается неизменной независимо от знака изменения полного сопротивления катушек 3 и 3'.

Разностный ток в катушках может быть определен по формуле

$$I_p = (I_0 + \Delta I) - (I_0 - \Delta I) = 2 \Delta I. \quad (8.9)$$

При среднем положении якоря ($\Delta \delta_0 = 0$) входная и выходная величины равны нулю (режим баланса) и, следовательно, $2 \Delta I = 0$, т.е. ток в при-

боре равен нулю. Входной величиной индуктивного датчика является отклонение якоря от среднего положения, а выходной величиной — разность токов в катушках 3 и 3'.

В дифференциальной схеме индуктивного датчика токи для каждой из ветвей будут делиться в соответствии с формулой (8.9):

$$I_{1m} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 \left[\frac{\omega^2}{R_{м.ст} + 2\delta_B/(\mu_0 S_m)} \right]^2}};$$

$$I_{2m} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 \left[\frac{\omega^2}{R_{м.ст} + 2(\delta_0 - \delta_B)/(\mu_0 S_m)} \right]^2}};$$

В мостовой схеме индуктивного датчика (рис.8.3) обмотки сердечников I и II включаются в смежные плечи моста. В два других плеча включаются одинаковые добавочные активные сопротивления R_d . Напряжение питания подается на одну диагональ моста, а выходное напряжение снимается с другой диагонали.

В режиме без нагрузки

$$I_1 = U/(R_d + R_{сб} + j\omega L_1); \quad I_2 = U/(R_d + R_{сб} + j\omega L_2). \quad (8.10)$$

Тогда выходное напряжение

$$U_{вых} = j\omega U R_d (L_2 - L_1) / (R_d + R_{сб} + j\omega L_1) (R_d + R_{сб} + j\omega L_2). \quad (8.11)$$

При перемещении якоря изменяется разность $L_2 - L_1$, а знаменатель дроби остается примерно постоянным. Выходное напряжение в мостовой схеме, так же как и в дифференциальной, при изменении направления перемещения якоря изменяет фазу на 180° (рис.8.4). $U_{вых} > 0$ при $x > 0$ для принятых на рис.8.3 положительных направлений.

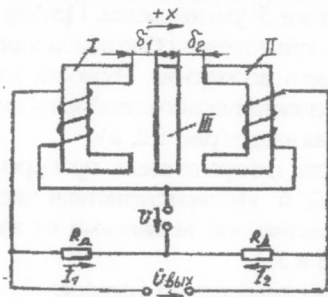


Рис.8.3. Мостовая схема индуктивного преобразователя

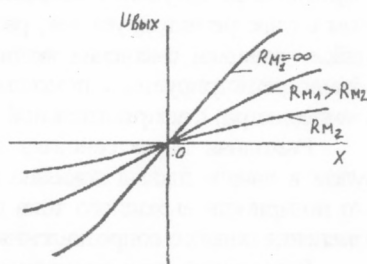


Рис.8.4. Характеристики мостовой схемы индуктивного преобразователя

В нагрузочном режиме при $R_n \neq \infty$ выходная характеристика идет аналогичным образом, но несколько ниже, так как при этом увеличивается падение напряжения на сопротивлении обмоток. При этом чем меньше R_n , тем ниже проходит выходная характеристика. В третьем квадранте фаза сигнала изменяется на противоположную.

Реверсивные индуктивные преобразователи по сравнению с неревверсивными имеют следующие преимущества: линейная часть выходной характеристики имеет большую протяженность; электромагнитное усилие, действующее на якорь, значительно меньше, чем усилия в неревверсивном преобразователе. Это объясняется частичной компенсацией электромагнитных усилий, действующих со стороны неподвижных сердечников. Полная компенсация происходит в нейтральном положении.

С помощью индуктивных датчиков можно контролировать механические перемещения, механические силы, температуру, свойства магнитных материалов; определять наличие дефектов или нежелательных примесей в телах материалов; контролировать диаметр стальной проволоки, толщину немагнитных покрытий на стали, движение жидкости и газов в резервуарах и др.

Достоинства индуктивных датчиков:

- простота и прочность конструкций, надежность в работе (отсутствие скользящих контактов);
- возможность подключения к источникам промышленной частоты;
- относительно большая величина мощности на выходе преобразователя (до нескольких десятков ватт), что дает возможность подключать контрольный прибор непосредственно к преобразователю;
- значительная чувствительность и большой коэффициент усиления.

Недостатки индуктивных датчиков:

- влияние колебания частоты питающего напряжения на точность работы;
- возможность работы лишь на переменном токе.

Индуктивные датчики используются на относительно низких частотах (до 3000 – 5000 Гц), так как на высоких частотах резко растут потери в стали на перемагничивание и вихревые токи.

9. ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ДАТЧИКИ

Трансформаторные датчики широко применяются для измерения механических перемещений и сил.

Трансформаторные датчики представляют собой трансформаторные устройства с переменной магнитной связью между первичной и вторичной обмотками, включенными в первичную и вторичную цепи.

В отличие от индуктивных, трансформаторные датчики не имеют гальванической связи между источником питания и цепью нагрузки.

В трансформаторных датчиках отсутствует скользящий контакт между подвижной и неподвижной частями.

Конструкции трансформаторных датчиков весьма разнообразны. В зависимости от предъявляемых требований они могут иметь или большую чувствительность, или высокую линейность, или не создавать усилия, действующего на подвижную часть преобразователя со стороны неподвижной.

Трансформаторные датчики по конструктивным особенностям в зависимости от вида подвижной части делятся на преобразователи:

- с перемещающимся якорем;
- с перемещающимся электромагнитным экраном (короткозамкнутым витком);
- с перемещающейся обмоткой.

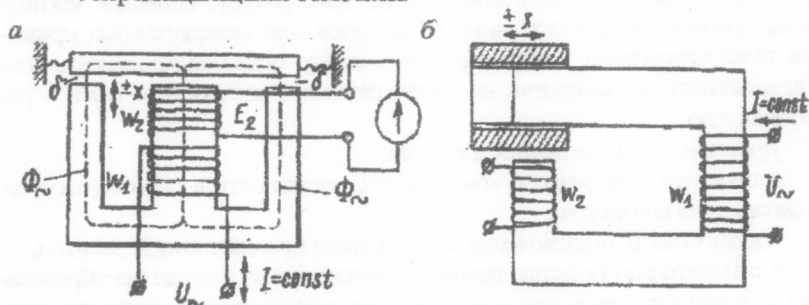


Рис. 9.1. Разновидности трансформаторных датчиков:
а — с перемещающимся якорем, б — с короткозамкнутым витком

Трансформаторный датчик с перемещающимся якорем (рис.9.1, а) используется для измерения малых перемещений. Обмотка возбуждения w_1 питается переменным напряжением U_{\sim} , которое создает в магнитопроводе переменный магнитный поток Φ_{\sim} . Во вторичной обмотке w_2 индуцируется ЭДС E_2 , величина которой находится в зависимости от величины зазора δ . При $I = \text{const}$

$$E_2 = \omega w_2 \Phi_{\sim} = f(x), \quad (9.1)$$

где ω — угловая частота.

Таким образом, индуцированная во вторичной обмотке E_2 будет функционально зависеть от контролируемой величины x .

Трансформаторный датчик с короткозамкнутым витком (рис.9.1,б). Под воздействием измеряемой величины x короткозамкнутый виток может перемещаться в рабочем зазоре. В зависимости от того, какое положение занимает виток в зазоре, с ним сцепляется большая или меньшая часть основного магнитного потока, создаваемого обмоткой w_1 . В короткозамкну-

том витке индуцируются токи, которые создают активные потери, что эквивалентно введению в магнитную цепь дополнительного реактивного магнитного сопротивления X_M . При перемещении короткозамкнутого витка происходит изменение общего магнитного сопротивления, пропорциональное перемещению x .

Таким образом, если под действием контролируемой величины x перемещается короткозамкнутый виток, то будет изменяться магнитный поток, сцепленный с обмотками w_1 и w_2 , а следовательно, и ЭДС во вторичной обмотке. Прибор, включенный во вторичную обмотку w_2 , покажет изменение измеряемой величины Δx .

К недостаткам трансформаторных датчиков относятся наличие остаточного сигнала и подверженность помехам со стороны электромагнитных полей, если не приняты соответствующие меры.

Если в датчиках с перемещающимся якорем действует электромагнитная сила, возникающая между подвижной и неподвижной частями, то в датчиках с короткозамкнутым витком возникает электродинамическая сила при взаимодействии потока первичной обмотки с током витка, которая достигает существенной величины. Кроме того, датчики с короткозамкнутым витком имеют значительные фазовые и температурные погрешности, поэтому они находят ограниченное применение.

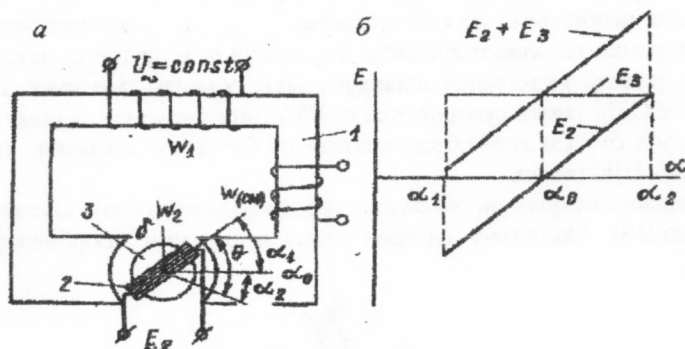


Рис.9.2. Трансформаторный датчик угла поворота (а) и его характеристика (б)

Трансформаторный датчик угла поворота (рис.9.2, а). Этот датчик получил широкое применение в телемеханике для передачи на расстояние показаний различных приборов и измерения больших угловых перемещений. Он состоит из неподвижного шихтованного магнитопровода 1 с обмоткой w_1 , поворотной рамки 2 с обмоткой w_2 , обмотки смещения w_{cm} и сердечника 3. Рамка может поворачиваться в кольцевом зазоре магнитопровода вокруг сердечника 3. Катушка возбуждения w_1 создает переменное

магнитное поле, индукция которого равномерна в зоне полюсов (в пределах угла $\theta = \alpha_1 - \alpha_2$). Если подвижная рамка расположена горизонтально (положение α_0), то наведенная в ней ЭДС равна нулю, так как магнитные линии не пересекают витков рамки. При крайних положениях рамки (α_1 или α_2) индуцированная в ней ЭДС E_2 имеет максимальное значение.

ЭДС, индуцируемая в рамке при повороте ее на некоторый угол α

$$E_2 = 2(\omega\sqrt{2})B_0bw_2R_p \alpha, \quad (9.2)$$

где ω — угловая частота ($\omega = 2\pi f$); B_0 — амплитудное значение магнитной индукции в зазоре; b — активная длина провода рамки, пересекаемого полем; w_2 — число витков рамки; R_p — средний радиус рамки.

При постоянных значениях частоты и напряжения источника питания $E_2 = k\alpha$, т.е. наведенная в рамке ЭДС пропорциональна углу поворота α .

При переходе рамки через горизонтальное положение фаза E_2 изменяется на 180° (рис. 9.2, б). С помощью соответствующей формы полюсных наконечников можно получить прямолинейную статическую характеристику при повороте рамки на угол 170° от нейтрального положения.

Если осуществить механическую связь оси рамки с осью поворота стрелки измерительного прибора, то можно преобразовать показания прибора в электрическое напряжение.

Когда необходимо получить изменение ЭДС от 0 до максимума при повороте рамки из одного крайнего положения α_1 в другое α_2 , последовательно с рамкой включается дополнительная обмотка смещения. В этом случае ЭДС E_2 рамки суммируется с ЭДС, индуцируемой в обмотке $w_{см}$ (см. рис. 9.2, б). При этом обеспечивается необходимое смещение нулевого значения ЭДС рамки.

Датчик с вторичной обмоткой, перемещающейся вдоль магнитопровода (рис. 9.3). Магнитная система имеет воздушный зазор между вер-

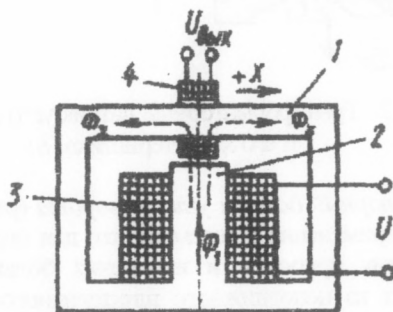


Рис.9.3. Датчик линейных перемещений

тикальным сердечником 2 и горизонтальным 1. Последний охватывает вторичная обмотка 4. Первичная обмотка 3, питаемая от источника U и создающая поток Φ_1 , расположена на среднем сердечнике. При симметричном расположении вторичной обмотки она пронизывается равными и противоположно направленными магнитными потоками Φ_2 и Φ_3 , и поэтому результирующий сигнал близок к нулю. При смещении x обмотки один из потоков возрастает, а другой убывает, в результате чего образуется выходной сигнал $U_{\text{вых}}$ зависящий от перемещения.

Дифференциальные трансформаторные датчики (ДТД) благодаря своим качествам получили наибольшее распространение для измерения неэлектрических величин. К числу положительных качеств следует отнести:

- высокую чувствительность, которая обеспечивается за счет возможного выполнения вторичной обмотки датчика с большим числом витков;
- возможность измерения весьма малых перемещений;
- значительный линейный участок характеристики.

ДТД представляет собой два совмещенных трансформатора с общим подвижным якорем. Различают несколько конструктивных форм дифференциально-трансформаторных датчиков, которые отличаются друг от друга магнитной системой:

- плоские ДТД с магнитопроводом плоской формы;
- цилиндрические ДТД, у которых магнитопровод имеет круглое сечение.

Плоский ДТД с двумя отдельными магнитопроводами (рис. 9.4, а). Каждый из магнитопроводов датчика имеет первичную w_1 и вторичную w_2 обмотки. Обе половины первичной обмотки имеют одинаковое число витков и включаются последовательно, а вторичные обмотки — встречно (рис. 9.4, б).

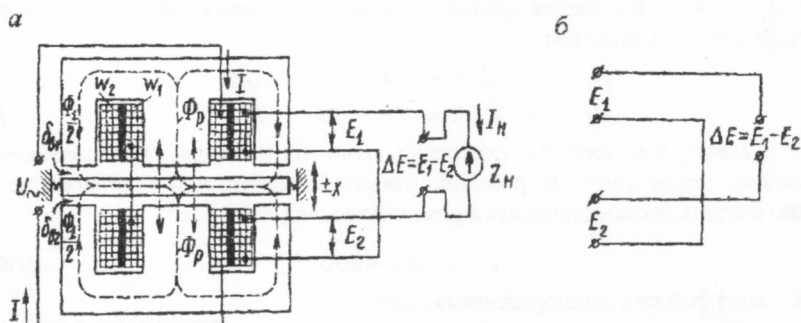


Рис. 9.4. ДТД с двумя отдельными магнитопроводами (а) и схема включения его вторичных обмоток (б)

Магнитодвижущая сила (МДС) $F = Iw_1$, созданная током I , протекающим в последовательно соединенных первичных обмотках, наводит в каждом магнитопроводе датчика магнитный поток, состоящий из магнитного потока рассеяния Φ_p между полюсами (величина этого магнитного потока одинакова для обоих магнитопроводов и не изменяется с изменением положения якоря) и рабочих магнитных потоков Φ_1 и Φ_2 между полюсами и якорем. Величина рабочих потоков зависит от намагничивающей силы Iw_1 и магнитной проводимости G между полюсом и якорем. Магнитная проводимость воздушных зазоров G — величина, обратная магнитному сопротивлению R_m магнитной цепи.

Величина магнитной проводимости зависит от площади полюса S и длины зазора δ_b следующим образом:

$$G = \mu_0 S / (2 \delta_b), \quad (9.3)$$

где μ_0 — магнитная проницаемость воздуха ($\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Г/м).

Значения магнитных потоков определяются выражениями:

$$\Phi_1 = \sqrt{2} I w_1 G_1, \quad \Phi_2 = \sqrt{2} I w_1 G_2, \quad \Phi_p = \sqrt{2} I w_1 G_p.$$

E_1 и E_2 , наводимые во вторичных обмотках, равны

$$E_1 = (\omega / \sqrt{2}) w_2 (\Phi_1 + \Phi_p) = (\omega / \sqrt{2}) I w_1 w_2 (G_1 + G_p); \quad (9.4)$$

$$E_2 = (\omega / \sqrt{2}) I w_1 w_2 (G_2 + G_p). \quad (9.5)$$

При нейтральном положении якоря имеет место равенство $\delta_{b1} = \delta_{b2} = \delta_0$, $G_1 = G_2 = G_0$, $\Phi_1 = \Phi_2$ и, следовательно, равенство значений $E_1 = E_2$. Результирующая ЭДС на выходе датчика равна нулю. При воздействии на якорь контролируемой величины зазор между якорем и одним из сердечников становится меньше, т. е. $\delta_{b1} = \delta_0 - \Delta x$ (при смещении якоря вверх), а между другим сердечником и якорем — больше, т. е. $\delta_{b2} = \delta_0 + \Delta x$, где Δx — смещение якоря. Соответственно изменяются проводимости: $G_1 = G_0 + \Delta G_1$, $G_2 = G_0 - \Delta G_2$. Подставляя данные значения проводимостей G_1 и G_2 в формулы (9.4) и (9.5), получим

$$E_1 = (\omega / \sqrt{2}) I w_1 w_2 (G_0 + \Delta G_1 + G_p); \quad (9.6)$$

$$E_2 = (\omega / \sqrt{2}) I w_1 w_2 (G_0 - \Delta G_2 + G_p). \quad (9.7)$$

В некоторых пределах смещения якоря от нейтрального положения изменение проводимостей рабочих зазоров с некоторым приближением можно считать пропорциональным смещению якоря Δx , т. е.

$$\Delta G_1 = \Delta G_2 = k \Delta x, \quad (9.8)$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Плоский ДД с общим магнитопроводом (рис. 9.5). Такой датчик реагирует не на изменение величины воздушного зазора, а на изменение его площади. На среднем сердечнике размещается первичная катушка w_1 , на двух крайних — вторичные w_2 (вторичные обмотки соединены встречно).

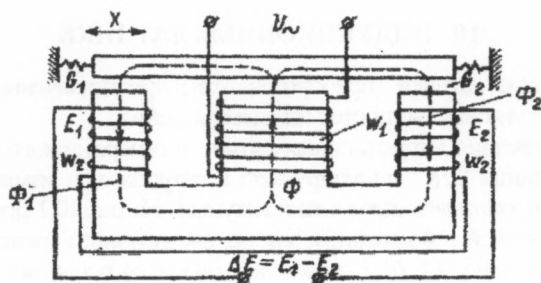


Рис. 9.5. Плоский ДТД с общим магнитопроводом

Магнитный поток Φ , определяемый первичной катушкой, разветвляется влево и вправо пропорционально магнитным проводимостям левой и правой частей магнитопровода. При симметричном расположении якоря в магнитопроводе магнитные проводимости обеих частей системы равны друг другу, т.е. $G_1 = G_2$, а следовательно, равны $E_1 = E_2$.

При смещении якоря влево или вправо изменяются потоки Φ_2 или Φ_1 , а значит, и ЭДС E_2 или E_1 , т.е. $\Delta E = E_1 - E_2$. Фаза ΔE изменяется на 180° при смещении якоря в другую сторону от нейтрального положения.

Цилиндрический ДТД с сосредоточенной первичной обмоткой (рис. 9.6) применяется, как правило, при малых ходах якоря. На общем изоляционном каркасе 1 расположены три катушки: первичная w_1 и две вторичные w_2' и w_2'' . Обе вторичные катушки имеют строго одинаковое число витков и выполняются проводом одного диаметра. Внутри катушек перемещается якорь 3 цилиндрической формы (шпунжер), на который воздействует контролируемая величина x . Снаружи катушки охватываются круглым магнитопроводом 2 из листовой электротехнической стали.

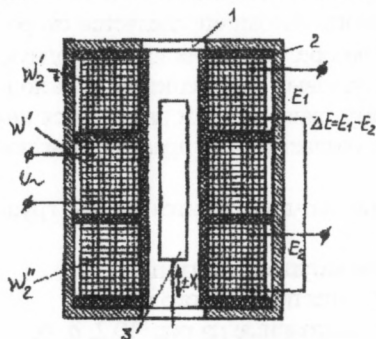


Рис. 9.6. Цилиндрический ДТД

При нейтральном положении якоря наведенные в обмотках ЭДС будут равны ($E_1 = E_2$), а выходное значение ЭДС равно нулю ($\Delta E = 0$). При смещении якоря вверх или вниз от нейтрального положения на величину Δx нарушается равенство ЭДС (так как магнитный поток в одной катушке, например w_2' , увеличивается, а в другой, w_2'' , уменьшается) и результирующая ЭДС, равная разности ЭДС в катушках, приобретает некоторое значение (при встречном включении вторичных катушек)

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \sqrt{2} \omega I w_1 w_2 k \Delta x, \quad (9.9)$$

где I — ток, протекающий в первичной катушке; w_2 — общее число витков вторичной катушки, Δx — величина смещения якоря.

10. ИНДУКЦИОННЫЕ ДАТЧИКИ

Индукционные датчики (преобразователи) предназначены для измерения линейных и угловых скоростей или перемещений.

Принцип действия индукционных датчиков генераторного типа основан на использовании ЭДС, индуцируемой в катушке при изменении магнитного потока, пронизывающего витки катушки. На рис. 10.1 показана схема датчика с обмоткой в воздушном зазоре, аналогичного трансформаторному датчику (см. рис. 9.1, б). Однако, в отличие от последнего, обмотка w_1 датчика питается постоянным напряжением U . Под воздействием измеряемой величины x обмотка w_2 начнет перемещаться и по закону электромагнитной индукции индуцированная в этой обмотке ЭДС E будет определяться скоростью изменения магнитного потока $d\Phi/dt$, т.е. $E = -w_2 d\Phi/dt$.

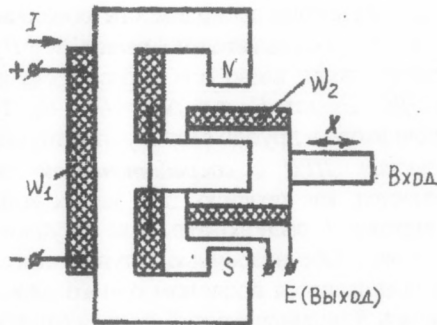


Рис. 10.1. Схема датчика с обмоткой в воздушном зазоре

Так как скорость изменения магнитного потока определяется скоростью перемещения обмотки в воздушном зазоре, то датчик имеет входную величину в виде скорости линейных или угловых перемещений, а выходную в виде индуцированной ЭДС. Поэтому такие датчики называются *индукционными*. Магнитный поток Φ в них создается, как правило, при помощи постоянных магнитов.

По принципу действия индукционные датчики делятся на две группы:

- датчики со взаимным перемещением катушки и магнита;
- датчики с изменяющейся величиной поля постоянного магнита.

К первой группе относятся датчики, показанные на рис. 10.2, а, б.

В них катушка 1 связана с подвижной частью устройства 2 (первичный измеритель), который перемещается относительно постоянных магнитов 3.

В этом случае индуцированная ЭДС наводится в катушке 1 благодаря линейным (см. рис. 10.2, а) или угловым (см. рис. 10.2, б) перемещениям катушки в зазоре магнита.

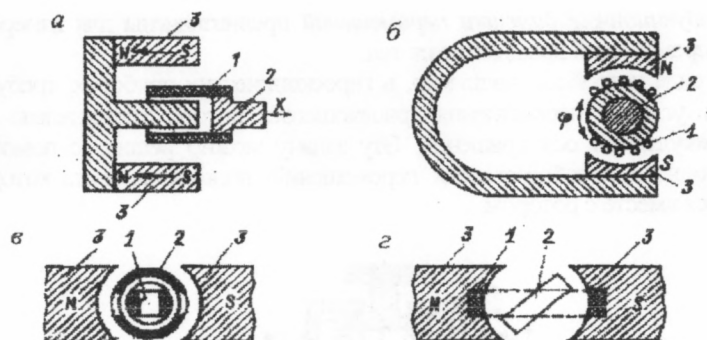


Рис. 10.2. Разновидности индукционных генераторных датчиков:
 а, б — датчики со взаимным перемещением катушки и магнита;
 в, г — датчики с изменяющейся величиной поля постоянного магнита.

ЭДС с катушки 1 снимается при помощи коллектора и щеток. В некоторых практических конструкциях катушка выполняется неподвижной, а перемещается постоянный магнит.

В индукционных датчиках второй группы (см. рис. 10.2, в, г) постоянный магнит и катушка 1 неподвижны, а кольцо 2 (см. рис. 10.2, в), или якорь 2 (см. рис. 10.2, г) являются подвижными и механически связанными с испытуемым устройством.

В индукционных датчиках первой группы магнитный поток Φ не изменяется. Индуцированная ЭДС на выходе датчика

$$E = k\Phi \, dv/dt, \quad (10.1)$$

где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от конструктивных параметров преобразователя.

В индукционных датчиках второй группы магнитный поток Φ не является постоянным, что объясняется изменением во времени магнитного сопротивления, а также влиянием поверхностного эффекта.

Наибольшее изменение магнитного потока:

$$\Delta\Phi = F/R_M - F/(R_M + \Delta R_M), \quad (10.2)$$

где F — намагничивающая сила магнита, R_M и $R_M + \Delta R_M$ — крайние значения магнитного сопротивления.

ЭДС, наводимая в катушке:

$$E = \frac{\omega w F}{2\sqrt{2}} \left(\frac{1}{R_M} - \frac{1}{R_M + \Delta R_M} \right), \quad (10.3)$$

где ω — круговая частота, w — число витков катушки датчика.

Индукционные датчики перемещений предназначены для измерения малых перемещений вращающихся тел.

В ряде устройств, например, в гироскопических приборах, требуется измерять угловые перемещения вращающегося ротора относительно оси, перпендикулярной оси вращения. Эту задачу можно решить с помощью индукционного преобразователя перемещений, подвижная часть которого вращается вместе с ротором.

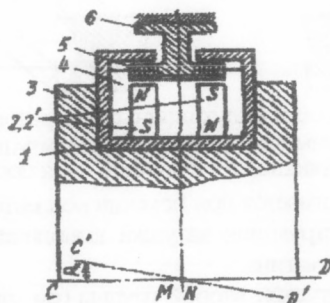


Рис. 10.3. Индукционный преобразователь угловых перемещений

Принципиальная схема датчика изображена на рис. 10.3. Магнитопровод 1 жестко связан с вращающимся ротором 3. Катушка 5 крепится к корпусу прибора с помощью пластмассового кронштейна 6 и находится в неподвижном состоянии. Такое крепление катушки позволяет устранить гибкие токоподводы, накладывающие вредный момент на подвижную часть устройства. Магнитная система датчика состоит из магнитопровода 1 и постоянных магнитов 2 и 2', создающих магнитный поток в воздушном зазоре 4. Магнитная система вместе с ротором может поворачиваться на небольшие углы относительно оси MN, перпендикулярной плоскости чертежа. При вращении ротора постоянные магниты, имеющие противоположную полярность, наводят в катушке ЭДС, пропорциональную разности магнитных потоков, пересекающих ее. При симметричном положении катушки 5 относительно магнитопровода 1, т.е. при отсутствии угла отклонения ротора, ЭДС, наводимая в катушке, вследствие равенства потоков равна нулю. При смещении катушки относительно магнитной системы на выходе преобразователя появляется сигнал, пропорциональный этому смещению (углу отклонения α):

$$U_{\text{вых}} = \pi / 15 B_g r^2 w_c \alpha, \quad (10.4)$$

где n – число оборотов вала в минуту, r и α – средний радиус и угловое смещение катушки относительно ротора.

Из выражения (10.4) следует, что амплитуда выходного сигнала про-

порциональна индукции в воздушном зазоре, скорости вращения ротора, числу витков сигнальной катушки, угловому перемещению и зависит от квадрата расстояния от оси вращения ротора до центра катушки.

В некоторых преобразователях углового перемещения выходной величиной может быть и частота электрического сигнала в обмотке катушки.

В большинстве конструкций индукционных датчиков (линейных и угловых перемещений) зависимость величины ЭДС от скорости перемещения является линейной. Практически линейность таких датчиков составляет 0,5 – 1,5 %.

Погрешность индукционных датчиков вызывается нестабильностью параметров магнитных материалов во времени и может достигать значения 0,5 – 1,5%. Индукционные датчики обладают большой точностью и чувствительностью, что позволяет непосредственно использовать их для измерения скорости без применения усилительных элементов. При проектировании таких датчиков следует учитывать величины нагрузки и окружающей среды, наличие момента, действующего на вал, скорость которого определяется.

В устройствах автоматики и телемеханики индукционные датчики нашли применение в качестве тахогенераторов постоянного и переменного токов небольшой мощности (1 – 100 Вт), вращающихся трансформаторов, и т.д.

11. ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

Разработке волоконно-оптических датчиков способствуют прежде всего достижения в производстве стеклянных волокон и их системных компонентов (разъемов, источников света, детекторов и т. п.). Попадающий в волоконно-оптический детектор световой пучок от источника света (рис. 11.1) под действием измеряемого параметра (например, давления, температуры, уровня и т. п.) претерпевает в детекторе изменение по интенсивности, поляризации, фазе или цвету и тем самым обеспечивает получение информации.

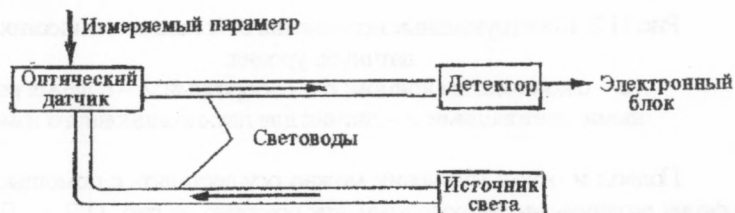


Рис. 11.1. Схема волоконно-оптического датчика для измерения различных параметров (температуры, уровня, давления и др.)

Распространение световых волн внутри датчика осуществляется по стеклянным волокнам, применяемым, например, в технике связи. Эти датчики новых типов находят применение прежде всего в условиях, характеризующихся наличием агрессивных паров или взрывоопасных газовых смесей, в зонах повышенной радиоактивности и сильных электромагнитных полей. Из множества используемых в настоящее время волоконно-оптических датчиков ниже описаны три характерных типа.

Волоконно-оптический датчик уровня (рис. 11.2, а) обеспечивает точное измерение уровня, т. е. его превышение или занижение относительно заданного значения. Свет от светодиода по световоду (LWL) направляется к коническому окончанию датчика и, отразившись от него, попадает на детектор. При погружении конического конца датчика в жидкость разность показателей преломления изменяется, и отклонявшийся ранее из-за полного отражения свет выходит из конического конца датчика и уже не попадает на детектор. Получающееся в результате изменение интенсивности света служит сигналом о достижении заданного уровня.

Принцип действия **U-образного датчика уровня** (рис. 11.2, б) аналогичен: как только освобожденная от оболочки изогнутая часть волокна световода окажется погруженной в жидкость, детектор регистрирует изменение интенсивности света.

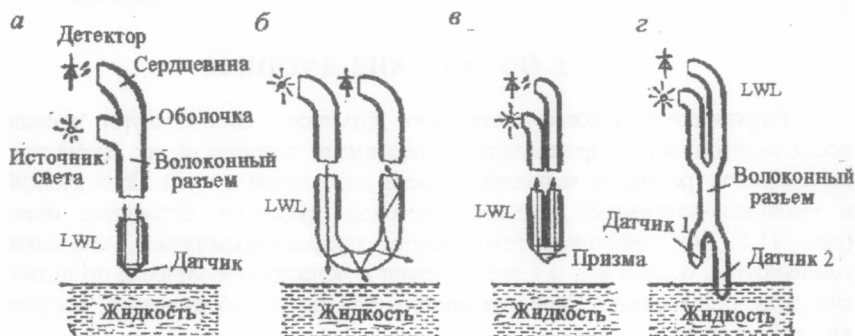


Рис. 11.2. Конструктивные исполнения волоконно-оптических датчиков уровня:

а — с коническим концом, б — U-образный, в — с двумя различными световодами, г — датчик для двухпозиционного измерения

Подвод и отвод излучения можно осуществлять с помощью датчика с двумя различными световодами, как показано на рис. 11.2, в. В этом случае свет отклоняется призмой.

Датчик для двухпозиционного измерения уровня изображен на рис. 11.2, г. Здесь интенсивность на детекторе претерпевает два скачка, а именно при погружении датчиков 1 и 2 соответственно.

Эту схему можно расширить, соединяя несколько таких концевых датчиков (с двумя точками замера каждый) в единую систему. В результате с помощью 5 концевых датчиков можно контролировать 10 точек, что обеспечивает почти непрерывный контроль уровня.

Волоконно-оптический датчик температуры. По сравнению с обычными способами измерение температуры с помощью волоконно-оптических датчиков значительно более трудоемко. Однако для определенных случаев применения эти затраты оправданы, так как известные способы оказываются подверженными действию помех.

Волоконно-оптический датчик температуры применяют:

- при промышленном использовании ВЧ- и микроволновой техники (пищевая промышленность, вулканизация, прогрев клеев, нанесение пластиковых покрытий, индукционный нагрев и т. д.);

- в химической технологии (измерение температуры в сильнокоррозионных средах, в электрохимических процессах, в случае взрывоопасных и легко воспламеняющихся материалов).

- в электротехнической и электронной промышленности (компоненты схем высокого напряжения, тепловые характеристики управляющих цепей и электронных компонентов, измерения при изготовлении полупроводников, горячие зоны в трансформаторах высокой мощности и т. д.).

- в биологии и медицине (биологические эффекты при воздействии электромагнитного излучения, перегревы из-за воздействия микроволнового излучения и т. д.).

- в исследовательской практике (измерение мельчайших образцов, измерения при наличии электрических полей, ВЧ-плазмы или электронных пучков, точное измерение поверхностей материалов с плохой электропроводностью).

Принцип действия волоконно-оптического датчика температуры основан на температурной зависимости интенсивности различных флуоресцентных линий некоторых люминофоров. Устройство такого датчика показано на рис. 11.3. Через систему отображения (L_1 , F , D_1 , D_2 , D_3 , L_3) испускаемое источником (Si) УФ-излучение фокусируется в кварцевом световоде, конец которого покрыт слоем тефлона PFA (наружный диаметр 0,7 мм). На конце световода находится слой люминофора ($La_2O_2S:Eu$) толщиной 0,13 мм, который под действием УФ-излучения испускает флуоресцентное излучение в спектральном диапазоне 500 – 600 нм. Это излучение, в свою очередь, снова направляется по световоду в оптическую систему, где из него фильтрами IF_1 и IF_2 выделяются две специфические линии I и R . Отношение интенсивностей I/R , определяемое электронным способом, является монотонной функцией температуры в области от – 50 до +250 °C. Разрешение равно 0,1 °C при погрешности $\pm 2^\circ\text{C}$.

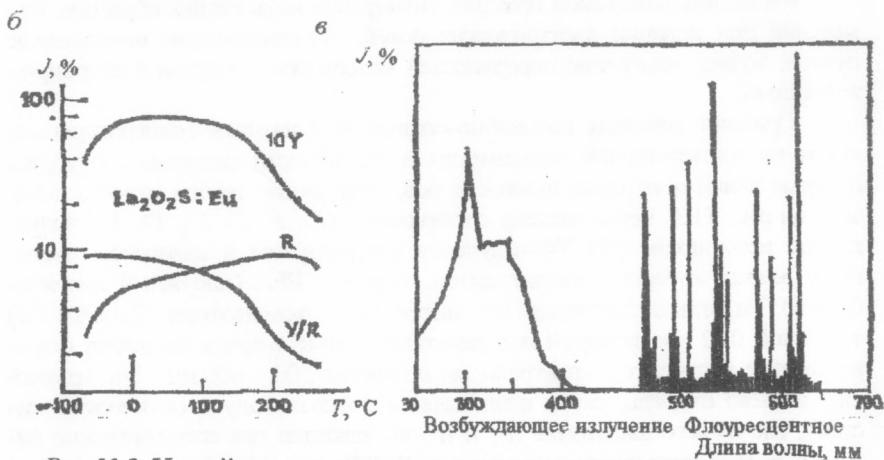
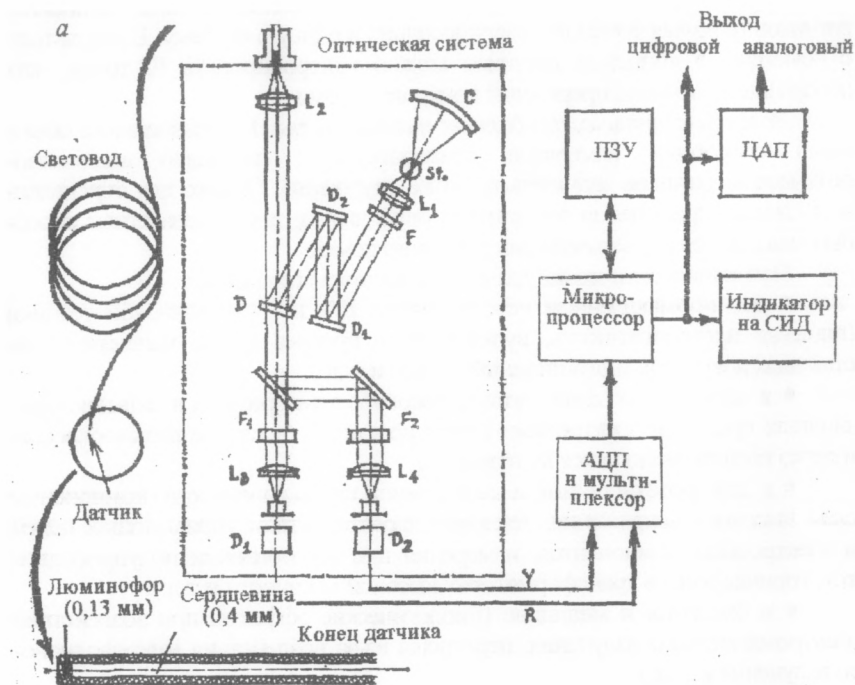


Рис. 11.3. Устройство волоконно-оптического датчика температуры (а), зависимость интенсивности спектральных линий Y и R от температуры (б) и распределение интенсивности возбуждающего и флуоресцентного излучения (в)

Волоконно-оптический датчик для измерения переменного тока. На рис. 11.4 изображен датчик для бесконтактного измерения тока в диапазоне 0,2 – 6000 А. В нем используется принцип измерения на основе эффекта Фарадея.

Линейно поляризованный луч лазера вводится в катушку из световода, по оси которой проходит токонесущий кабель. Под действием тока I плоскость поляризации света поворачивается (эффект Фарадея) на угол $\alpha(I) = 2NVI$, где N – число витков световода вокруг кабеля, V – постоянная Верде материала световода.

Затем с помощью призмы Волластона (ВП) взаимно перпендикулярные компоненты поляризации направляются на детекторы D_1 и D_2 . Сигналы детекторов подаются далее на вычислительный прибор. В итоге результаты измерений имеют отклонение от линейности менее 1 %.



Рис. 11.4. Волоконно-оптический датчик для измерения переменного тока на основе эффекта Фарадея

12. ДАТЧИКИ РАСХОДА И СКОРОСТИ

В промышленной измерительной технике требуются очень точные методы определения расхода и скорости потока. При этом допустимые погрешности не должны превышать одного процента, а иногда и одной десятой процента. Довольно точные измерители расхода требуются иногда и в быту (например, газовый счетчик). При таких требованиях к точности применяют чаще всего механические измерительные приборы. Лишь в последнее время появились оптоэлектронные измерители расхода и скорости, работающие на оптическом эффекте Доплера. Эти лазерные доплеровские анемометры (рис. 12.1) используют особый вид рассеяния света (эффект Доплера), рассмотреть который более подробно здесь не

представляется возможным. В данном случае луч лазера разделяется светоделительной пластинкой на два отдельных световых пучка, которые фокусируются затем с помощью линзы в протекающей среде. Рассеянный потоком свет попадает далее на фотодетектор (фотоумножитель), где он преобразуется в электрический ток. Усиленный доплеровский сигнал электронным путем преобразуется затем в пропорциональное расходу измерительное напряжение.

Такой способ измерения расхода довольно дорог, но его достоинство состоит в том, что поток не искажается процедурой измерения и профиль потока может быть измерен хорошим разрешением, так как регистрируется только скорость в точке фокуса. Однако для любительской практики этот метод не пригоден.

Измерение расхода можно осуществить электронным путем, применяя в качестве датчика самонагревающийся резистор. Сопротивление тако-

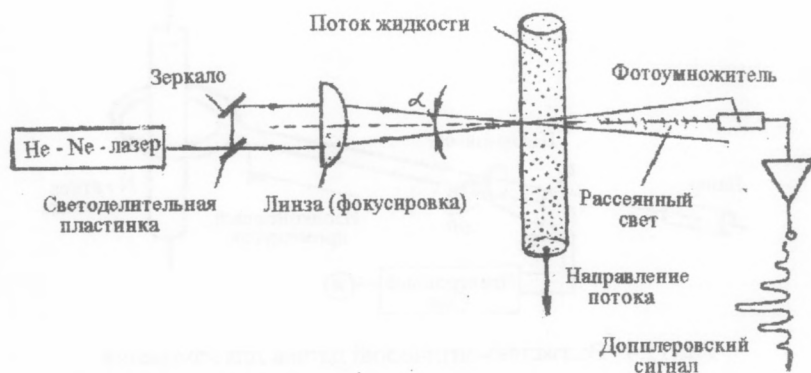


Рис. 12.1. Устройство лазерного доплеровского анемометра для измерения скоростей потоков в трубопроводе

го резистора изменяется вследствие охлаждения потоком, в результате чего резистор действует как датчик расхода. На рис. 12.2 показан элемент датчика, установленный в канале потока. Ток I нагревает этот элемент до температуры $T_1 > T_2$. В этих условиях теплоотвод осуществляется несколькими путями:

- P_{L1} — теплопроводность через среду потока к стенкам трубы, $P_{L1} \sim T_1$;
- P_{L2} — теплопроводность через механический держатель и электропровода, $P_{L2} \sim T_1$;
- $P_{стр}$ — теплопередача путем излучения;
- $P_{К1}$ — теплопередача путем свободной конвекции, $P_{К1} \sim T_1$;

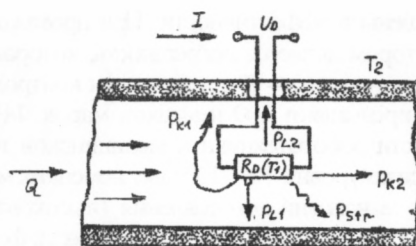


Рис. 12.2. Схематическое изображение процессов теплопередачи от самонагревающегося резистора в канале потока

P_{K2} – теплопередача путем вынужденной конвекции (поток):

$$P_{K2} \sim T_1 \sqrt{Q}, \quad (12.1)$$

где Q – объемный расход

В итоге омический элемент датчика оказывается в состоянии теплового равновесия, т. е. количество подводимой энергии равно количеству отводимой.

Поскольку подводимая электрическая энергия равна $I^2 R(T_1)$, равновесие определяется выражением

$$I^2 R(T_1) = P_{L1} + P_{L2} + P_{\text{пр}} + P_{K1} + P_{K2}, \quad (12.2)$$

где P_{K2} представляет собой собственно измеряемую величину, так как она определяется потоком в канале. Поэтому все остальные формы теплопередачи могут быть выражены константой. В этом случае получается так называемое уравнение Кинга

$$I^2 R(T_1) = (\alpha_1 + \alpha_2 Q^n) (T_1 - T_2), \quad (12.3)$$

где $n = 0,5$.

В этом уравнении α_1 и α_2 можно считать аппаратными параметрами, остающимися постоянными в известных пределах.

13. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДАТЧИКОВ

Возможные области применения датчиков чрезвычайно разнообразны, можно выделить лишь отдельные сферы

- промышленная техника измерения и регулирования;
- робототехника;
- автомобилестроение;
- бытовая техника;
- медицинская техника.

Применимость того или иного датчика в этих сферах определяется прежде всего отношением цены и эффективности. При промышленном применении определяющим фактором является погрешность, которая при регулировании процессов должна составлять 1 – 2%, а для задач контроля 2 – 3 %. В этих случаях цены датчиков превышают 100 немецких марок ФРГ. Для специальных применений в области робототехники и медицинской техники цены датчиков могут достигать даже уровня 10 – 100 тыс. немецких марок ФРГ. Благодаря внедрению новых технологий изготовления (высоковакуумное напыление, распыление, химическое осаждение из газовой фазы, фотолитография и т. д.) и материалов непрерывно расширяются сферы применения датчиков, недоступные ранее из-за их высокой цены.

Датчики в промышленной технике измерений. Высокий спрос на промышленные датчики обусловлен прежде всего тем, что автоматизация приобретает все больший масштаб в производственных процессах. Контроль и управление технологическим процессом с помощью вычислительной сети связи требуют множества детекторов, совместимых с микропроцессорами (рис.13.1).



Рис. 13.1. Производственные этапы и схема автоматизации производства

В области промышленной техники датчики используют для измерения:

- расхода, количества,
- давления, разности давлений,
- температуры,
- уровня,
- химического состава;

- оптические датчики, волоконно-оптические датчики,
- биодатчики (биотехнология),
- многокоординатные датчики (анализ шумов, распознавание образов).

Для современных производств характерна тенденция применения датчиков в интерактивном режиме, т.е. когда результаты измерений сразу же используются для регулирования процесса. Благодаря этому в любой момент обеспечивается корректировка технологического процесса, что ведет к увеличению выхода продукции, а значит, и к более рациональному производству. Естественно, такие датчики должны обладать исключительной надежностью, чтобы обеспечить непрерывный и бесперебойный режим работы.

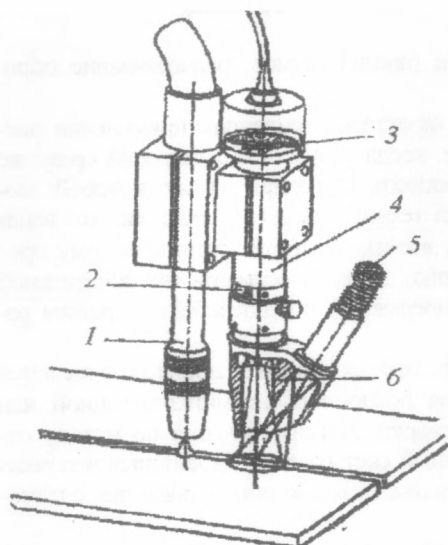
Примером прямого управления технологическим процессом является показанный на рис. 13.2 датчик для полностью автоматизированной или механизированной электродуговой сварки. Датчик работает по методу отражения падающего света. Отраженный свет создает на диодных цепочках характерные для геометрии шва сигналы, которые обрабатываются с помощью микро-ЭВМ.

Датчики в робототехнике. Применение роботов непосредственно вытекает из задач оптимизации технологии в промышленных производствах. В принципе робот представляет собой не что иное, как сложную информационную систему, которая объединяет в себе получение, обработку и преобразование информации. При получении информации через датчики роботу требуется прежде всего способность «видеть» и «ощупывать».

Первое оказывается возможным благодаря оптическим датчикам, которые должны быть приспособлены к соответствующим задачам робота.

На рис. 13.3 показан датчик для распознавания контуров объекта (ощупывания) роботом в сложных условиях окружающей среды. Например, в отжигательной печи при температуре 1000 °С датчик работает по методу измерения D-поля. Он состоит из трех электродов («Термакс», Ø 10, $\ell = 120$ мм), из которых два крайних формируют поле (рис. 13.4, а). На них подается в противофазе переменное напряжение (30 кГц, $V_{ss} = 25$ В)). Средний электрод служит измерительным электродом и при отсутствии механических помех не воспринимает никакого сигнального напряжения.

Если между электродами I и III или III и II находится объект, то происходит изменение диэлектрической постоянной, которое сопровождается появлением переменного тока на измерительном электроде. Подключенный выпрямитель преобразует измеряемую величину в постоянное на-



13.2. Оптический датчик для управления процессом сварки в среде защитного газа

1 – сварочная горелка; 2 – регулируемая диафрагма; 3 – фотодиодная матрица; 4 – оптика; 5 – световод; 6 – поворотная головка датчика

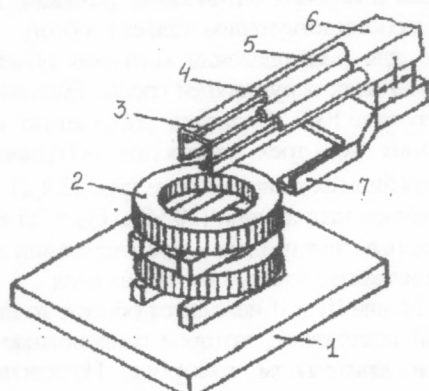


Рис. 13.3. Датчик манипулятора робота (на принципе D-поля):
1 – поддон; 2 – стопка шестерен; 3 – электроды; 4 – керамика;
5 – стальная трубка с облицовкой из «Термакса»;
6 – экран («Термакс»); 7 – захват

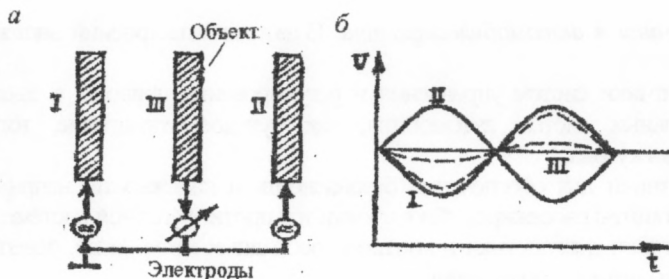


Рис. 13.4. Принцип действия датчика на основе измерения D-поля:
 а – I и II электроды, формирующие поле; III – измерительный электрод;
 б – прохождение сигнала при изменении диэлектрической постоянной
 в зависимости от положения объекта

пряжение, знак которого зависит от положения объекта (между электродами I и III или III и II) (рис. 13.4, б).

Датчики в бытовых приборах. В бытовой технике количество датчиков близко к числу датчиков, применяемых в автомобильной электронике. Только в ФРГ в 1980 г. в выпущенных бытовых приборах было использовано около 18 млн датчиков.

Распределение датчиков по частоте применения иллюстрируется гистограммой на рис. 13.5. Наибольшая доля в указанном ассортименте приходится на жидкостные регуляторы теплового расширения (температура), биметаллические переключатели (температура) и датчики давления.

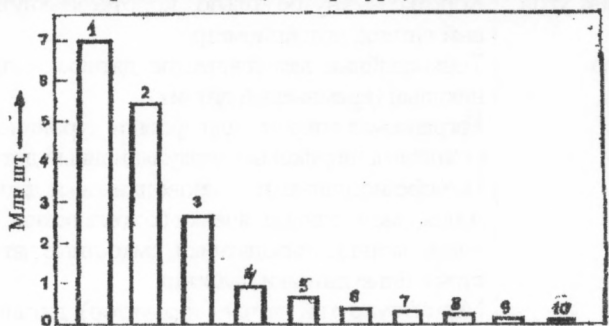


Рис. 13.5. Гистограмма распределения датчиков по частоте применения в бытовых приборах

1 – жидкостные регуляторы теплового расширения, 2 – биметаллические выключатели, 3 – датчики давления, 4 – терморезисторы с отрицательным ТКС, 5 – стержневые dilatометрические регуляторы, 6 – регуляторы потока, 7 – электромеханические датчики импульсов, 8 – датчики спиральных машин, 9 – резистивные датчики, 10 – датчики концентрации солевого раствора

Датчики в автомобилестроении. В автомобилестроении нашли применение:

- датчики систем управления и регулирования привода, а также таких отдельных систем автомобиля, как рулевое управление, тормоза, электроника кузова;
- датчики для обеспечения безопасности и надежности, например, в системах защиты пассажиров, блокировки и в противоугонной системе;
- датчики диагностики и контроля расходных материалов, освещения, тормозов и системы охлаждения;
- датчики для получения информации о расходе топлива, о наружной температуре и маршруте.

Физическими параметрами, измеряемыми с помощью этих датчиков, являются: температура, давление, скорость вращения, перемещение или угол, расход, усилие или момент, ускорение, влажность, парциальное давление (концентрация).

При изготовлении датчиков для автомобильной электроники все в большей мере применяют современные технологии (таблица).

Области применения датчиков в автомобиле

Измеряемый параметр	Принцип действия датчика
Скорость вращения (число оборотов)	Гальваномагнитные эффекты (эффект Холла, магниторезистивный эффект), эффект Виганда, электромагнитная индукция
Перемещение, угол	Короткозамкнутое кольцо, короткозамкнутый дисковый датчик, потенциометр
Температура	Тонкослойные металлические датчики, полупроводниковый (кремниевый датчик)
Расход	Нагреваемая спираль или фольга, турбинное колесо, (топливо), шариковый циркуляционный датчик
Давление	Пьезорезистивные полупроводниковые датчики давления, мембранные ячейки (с холловским сигналом, тонкослойные тензодатчики, емкостные датчики), толстослойные датчики давления
Момент	Магнитоупругий датчик (тордуктор), датчик, основанный на принципе вихревых токов, оптический датчик
Ускорение	Пружинно-инерционная система с тензодатчиками (фольга, тонкие слои), пьезоэлектрический датчик, пьезорезистивный полупроводниковый датчик (монокристаллический)
Концентрация кислорода	Диффузионный зонд из диоксида циркония

Заключение

За последние годы в технике измерения и регулирования параметров различных процессов в самостоятельную отрасль выделилось изготовление и применение датчиков. Эта отрасль, постоянно развиваясь, служит основой создания разнообразных вариантов систем автоматического регулирования.

Такое развитие обусловлено гигантским прогрессом электроники. Широкий спектр применяемых микро-ЭВМ в бытовой технике, автомобилестроении и других отраслях промышленности все в большей мере требует недорогих датчиков. Как следствие этого появились интересные разработки в области датчиков, учитывающие специфические вопросы миниатюризации и новых технологий.

К датчикам относятся все основные узлы электронной схемы для измерения неэлектрических величин, расположенные непосредственно около объекта. Развитие техники детектирования магнитных и электрических полей, электромагнитных волн (от инфракрасного до ультрафиолетового диапазона), малых количеств примеси в жидких и газообразных средах существенно расширило возможности измерений на удаленных, труднодоступных, движущихся объектах. Это сделало не обязательным расположение датчиков на объекте или вблизи его.

Общие тенденции к миниатюризации и компьютеризации коснулись, безусловно, и рассматриваемой области техники. При этом аналоговый сигнал датчика для обработки в микропроцессоре или микро-ЭВМ должен быть представлен в цифровом виде. Это осуществляется интерфейсным устройством, включающим в себя аналого-цифровой преобразователь. В последнее время наряду с созданием датчиков с цифровым выходным сигналом наблюдается тенденция к конструктивному объединению датчиков с микропроцессорными устройствами.

Особое внимание в предлагаемом пособии уделено новейшим разработкам и нетрадиционным вариантам применения датчиков (от промышленных объектов до бытовой техники), что существенно облегчает понимание и способствует развитию творческой инициативы студентов в этой области техники.

Список рекомендуемой литературы

- Виглеб Г. Датчики. Пер. с нем. – М.: Мир, 1989. – 196 с.: ил.
- Использование термоэлектротермопреобразователей при элементарных исследованиях синусоид // Энергетика. – 1996. – № 5. – С. 18 – 21.
- Квартин М.И. Электромеханические и магнитные устройства автоматики. Учеб. для учащихся электроприборостроит. техникумов. – М.: Высш. шк., 1979. – 352 с.: ил.
- Носов Ю.Р. 30-летие волоконно-оптической связи (К истории зарождения и развития) // Электросвязь. – 2001. – №1. – С. 40 – 43.
- Солодовников В.В., Плотноков В.Н., Яковлев А.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования: Учеб. пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1985. – 536 с.
- Чурилин А.А. Электрические аппараты. Общий курс: Учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.: ил.
- Электромеханические аппараты автоматики: Учеб. для вузов по спец. «Электрические аппараты» / Б.К. Буль, О.Б. Буль, В.А. Азанов, В.Н. Шеффа. – М.: Высш. шк., 1988. – 303 с.: ил.

Завражина Тамара Григорьевна

Д а т ч и к и

Учебное пособие

Редактор Л.И.Кузнецова

Печатается по постановлению
редакционно-издательского совета университета
Лицензия ЛР № 040328 от 10.04.97

Подписано в печать 8.04.02 Формат 60х84/16. Бумага писчая №1.
Усл. печ. л. 5,2. Уч.-изд. л. 6,0. Тираж 150 экз. Заказ 469
Издательство Российского государственного профессионально-педаго-
гического университета. Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11.

Ризограф РГПУ. Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11.

